Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 17, No. 1, Spring. 2019, p. 15-38

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، ص. ۳۸-۱۵

پایش عملکرد گندم و چغندرقند در استان خراسان: ۲- برآورد خلاء عملکرد

علیرضا کوچکی[1*]، مهدی نصیری محلاتی[1]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

چکیده

در این تحقیق عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد گندم آبی و چغندرقند در استان خراسان رضوی طی دوره‌ای ۱۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸۴) مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور بر اساس داده‌های درازمدت هواشناسی ۱۷ شهرستان و با استفاده از آنالیز خوشه‌ای سه ناحیه اقلیمی کشاورزی در استان خراسان رضوی از یکدیگر تفکیک شدند. پیش‌بینی عملکرد پتانسیل با استفاده از مدل شبیه‌سازی LINTUL1 انجام شد و پیش از استفاده از آن بر مبنای داده‌های عملکرد در معرض تعیین اعتبار متقابل قرار گرفت. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، عملکرد پتانسیل (YP) گندم آبی در نواحی اقلیمی کشاورزی ۱ (نیمه‌خشک و معتدل)، ۲ (خشک و گرم) و ۳ (نیمه‌خشک و گرم) به‌ترتیب ۷۲۴۸، ۶۴۷۸ و ۷۸۵۲ و درکل استان ۶۹۳۶ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. در حدود ۷۴ درصد از تغییرات سالانه YP گندم آبی ناشی از تغییر در طول دوره پر شدن دانه به دلیل افزایش درجه حرارت می‌باشد. خلاء عملکرد گندم آبی در هر سه ناحیه در طی ۵ سال ابتدای دوره به‌طور نسبی افزایش یافته و به حدود ۴ تن در هکتار رسید ولی از سال ۱۳۹۰ خلاء عملکرد در حال کاهش بوده به‌طوری‌که میزان خلاء قابل مهار آن در سال ۹۳ بین ۰/۵۰-۰/۴۸ عملکرد پتانسیل بوده است. میانگین عملکرد پتانسیل گندم دیم در نواحی اقلیمی بین ۲۸۰۰-۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار برآورد شد و بر این اساس میانگین خلاء نسبی استان در محدوده ۰/۸-۰/۷۵ به‌دست آمد. میانگین ۱۰ ساله عملکرد پتانسیل چغندرقند در نواحی اقلیمی استان خراسان رضوی بین ۸۸-۷۸ t ha^{-1} پیش‌بینی شد.

واژه‌های کلیدی: اطلس جهانی خلاء عملکرد، عملکرد پتانسیل، خلاء قابل مهار، تعیین اعتبار متقابل

مقدمه

برای تأمین نیاز غذایی جهان به غلات (گندم، برنج و ذرت) لازم است که تا سال ۲۰۵۰ میلادی تولید جهانی این محصولات نسبت به سال ۲۰۰۶ به میزان ۴۹ درصد افزایش یابد (Bruinsma, 2009) که البته بسته به سناریوهای مختلف تولید سوخت‌های زیستی باید ۹ تا ۱۹ درصد به این مقدار اضافه کرد (Fischer, 2009). تحقق این میزان از تولید مستلزم آن است که عملکرد این محصولات با نرخ ۱/۱۶ تا ۱/۳۱ درصد در سال افزایش یابد در حالی‌که سرعت فعلی افزایش عملکرد غلات در اغلب سیستم‌های زراعی کمتر از این مقدار است (Hall and Richards, 2013). باوجودی‌که برخی محققین (Ewert *et al.*, 2005; Jaggard *et al.*, 2010) پیش‌بینی کرده‌اند که روند فعلی رشد عملکرد در آینده نیز همچنان تداوم خواهد یافت ولی با توجه به شواهد موجود در مورد ثابت شدن روند عملکرد گندم (*Triticum aestium*)، برنج (*Oryza sativa*) و ذرت (*Zea mays*) در برخی مناطق جهان (Acreche *et al.*, 2008; Brisson *et al.*, 2010; Brisson *et al.*, 2011; Cassman *et al.*, 2010) و از جمله ایران (Koocheki and Nassiri Mahallati, 2014) حتی تداوم روندهای فعلی نیز چندان محتمل به‌نظر نمی‌رسد.

بر اساس برآورد فیشر و ادمیداس (Fischer and Edmeades, 2010) میانگین سرعت رشد عملکرد گندم در مناطق مختلف جهان بین ۰/۹-۰ درصد در سال می‌باشد که کمتر از ۱/۱۶ درصد پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۵۰ است. به‌علاوه این نرخ رشد در کشور چین یعنی بزرگترین تولیدکننده گندم در جهان بین ۰/۷۵-۰/۶۸ درصد در سال گزارش شده (Zhang *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2007) و در انگلستان نیز رشد عملکرد گندم در طی سال‌های ۲۰۰۷-۱۹۴۸ معادل ۰/۷۶ درصد در سال بوده است (Mackay *et al.*, 2011). در آمریکا سرعت رشد عملکرد ذرت در بهترین شرایط آبیاری و مصرف نیتروژن، ۰/۷۹ درصد در سال می‌باشد و متوسط عملکرد آن در تمام آمریکا در فاصله سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۲ ثابت مانده است (Grassini *et al.*, 2011). باید توجه داشت که سرعت افزایش عملکرد مفهومی متفاوت از میزان افزایش عملکرد می‌باشد برای مثال در فاصله سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ میلادی عملکرد غلات در جهان به میزان ۵۲/۶ کیلوگرم در هکتار در سال افزایش یافته است در حالی‌که در طی همین دوره سرعت افزایش عملکرد (درصد افزایش نسبت به سال مبنا) کاهش یافته و از ۳/۴ درصد در سال ۱۹۶۰ به ۱/۲ درصد در سال ۲۰۱۰ رسیده است (FAOSTAT, 2013).

۱- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: akooch@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/gsc.v17i1.62557

بنابراین با توجه به عوامل متعددی که در شکل‌گیری عملکرد نقش دارند تداوم این روند در دهه‌های آینده بعید به‌نظر می‌رسد.

از سوی دیگر به دلیل محدویت منابع اصلی تولید یعنی آب و زمین امکان افزایش تولید غذا از طریق افزایش سطح زیر کشت عملی به‌نظر نمی‌رسد برای مثال در مقیاس جهانی سطح زیر کشت گندم در طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۷ تنها ۸ درصد افزایش یافته و پیش‌بینی شده که این افزایش تا سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۰۷ تنها ۱ درصد باشد (Alexandratos and Bruinsma, 2012). بنابراین افزایش عملکرد مهمترین راه‌حل برای تأمین نیازهای غذایی آینده محسوب می‌شود. بالابردن عملکرد محصولات زراعی در مقیاس ملی و منطقه‌ای مستلزم آگاهی از پتانسیل عملکرد و پایش عوامل محدودکننده و کاهش‌دهنده آن می‌باشد (Lobell *et al.*, 2009).

عملکرد پتانسیل (بالقوه) در صورتی حاصل خواهد شد که آب و کلیهٔ مواد غذایی مورد نیاز برای رشد در حد مطلوب و در محیطی عاری از علف‌های هرز و آفات و بیماری‌ها فراهم باشد. در شرایط پتانسیل رشد به‌وسیله درجه حرارت، تشعشع، غلظت دی‌اکسید کربن و آن دسته از صفات ژنتیکی تعیین می‌شوند که بر طول دوره رشد (دوره رسیدگی ارقام) و جذب تشعشع (ساختار کانوپی) تاثیر دارند (Kiniry *et al*., 2004). عملکرد پتانسیل برای هر ژنوتیپ وابسته به اقلیم بوده و بنابراین و در مناطق مختلف متفاوت است ولی به خصوصیات خاک بستگی ندارد زیرا فرض بر این است که گیاه در بهترین شرایط رشد قرار داشته و آب و مواد غذایی به‌طور کامل تأمین شده‌اند (van Ittersum *et al.*, 2013). چنین عملکردی به‌ندرت در محصولات زراعی تحقق می‌یابد زیرا در بهترین شرایط مدیریت نیز ممکن است گیاه هرچند به مدت کوتاه در معرض کمبود آب یا نیتروژن قرار گیرد به‌علاوه آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز هیچ‌گاه به‌طور کامل قابل کنترل نخواهند بود (Muchow and Kropff, 1997). بنابراین در عمل تنها بخشی از این عملکرد تحقق خواهد یافت که دامنه آن بسته به روش مدیریت بسیار متغیر می‌باشد.

به‌طور کلی اختلاف بین عملکرد واقعی و حداکثر عملکرد قابل حصول در شرایط عدم وجود محدودیت (شرایط پتانسیل) خلاء عملکرد نامیده می‌شود. لازم به ذکر است که خلاء عملکرد علاوه بر عوامل محیطی، تحت تأثیر روش‌های مدیریت تولید محصولات زراعی نیز قرار دارد (Fischer, 2015). کاسمن (Cassman, 2003) ارزیابی این خلاء و تلاش برای پرکردن آن را به‌عنوان یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی محققین در قرن حاضر مطرح کرده و در این راستا طی دو دهه اخیر ارزیابی خلاء عملکرد محصولات زراعی در بسیاری از نقاط جهان (Abeledo *et al*., 2008; Espe *et al.*, 2016; Affholder *et al.*, 2013; Laborte *et al.*, 2012) و نیز در ایران (Nassiri Mahallati and Koocheki, 2009; Gharineh *et al.*, 2012; Parsa, 2008; Taei Semiromi *et al.*, 2012; Deihimfard *et al.*, 2015a; Deihimfard *et al.*, 2015b; Soltani *et al.*, 2016) مورد توجه قرار گرفته است. با شکل‌گیری اطلس جهانی خلاء عملکرد[1] این پایگاه چارچوب جدیدی را برای برآورد خلاء عملکرد ارائه کرده است (http://www.yieldgap.org) که تاکنون در کشور به‌کار گرفته نشده است. به‌علاوه نتایج پژوهش‌های موجود خلاء عملکرد را در یک مقطع زمانی (معمولاً سال اجرای تحقیق) برآورد کرده‌اند در صورتی‌که آگاهی از روند تغییرات این خلاء در طی زمان اطلاعات جامع‌تری را فراهم خواهد ساخت (van Bussel *et al.*, 2015; Merlosa *et al.*, 2015). براین اساس هدف از اجرای این پژوهش برآورد تغییرات زمانی خلاء عملکرد گندم آبی و چغندرقند در استان خراسان رضوی به روش پیشنهاد شده توسط اطلس جهانی خلاء عملکرد طی یک دوره ۱۰ ساله می‌باشد. به‌علاوه خلاء عملکرد گندم دیم نیز با استفاده از روش خط مرزی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

چارچوب مطالعه

براساس روش ارائه شده توسط اطلس جهانی خلاء عملکرد (van Bussel *et al.*, 2015; Grassini *et al.*, 2015; http://www.yieldgap.org/methods) مراحل محاسبه عملکرد پتانسیل محصولات زراعی در مقیاس منطقه‌ای (استان خراسان رضوی) شامل تعیین نواحی اقلیمی کشاورزی، انتخاب تعدادی شهر در هر ناحیه، انتخاب مدل شبیه‌سازی مناسب، واسنجی و تعیین اعتبار آن، پیش‌بینی عملکرد پتانسیل در شهرهای منتخب در هر ناحیه اقلیمی به‌وسیله مدل، تغییر مقیاس نتایج از شهرستان به ناحیه اقلیمی، و در نهایت تغییر مقیاس از نواحی اقلیمی به استان می‌باشد. لازم به ذکر است که این محاسبات باید طی دوره‌های زمانی (حداقل ۱۰ ساله) اجرا می‌شود و میانگین دوره، برآوردی از عملکرد پتانسیل ناحیه خواهد بود.

تعیین مناطق اقلیمی کشاورزی

داده‌های آب و هوایی مربوط به ۱۷ شهرستان منتخب در استان خراسان رضوی (شکل ۱) شامل حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه، بارندگی ماهانه و تعداد ساعات آفتابی روزانه مربوط به دوره ۱۰ ساله ۱۳۹۳-۱۳۸۴ از پایگاه داده‌های مرکز ملی اقلیم‌شناسی خراسان جمع‌آوری شد. میزان تشعشع روزانه به روش ارائه شده در مدل سوکروز (Van Laar *et al*., 1997) به‌دست آمد. در این روش ابتدا تشعشع روزانه بدون احتساب آتمسفر برآورد می‌شود و سپس با استفاده از داده‌های تعداد ساعات آفتابی و براساس معادله آنگستروم

1- Global yield gap atlas

ضریب نشر آتمسفر[1] برای روزهای سال محاسبه شده و تشعشع روزانه به‌دست می‌آید.



شکل ۱- موقعیت ۱۷ شهرستان منتخب در استان خراسان رضوی که در این تحقیق مورد بررسی فرار گرفته است.

Figure 1- Location of 17 selected districts within the Khorasan Razavi province subjected to the analysis

بر اساس پروتکل ارائه شده توسط اطلس جهانی خلاء عملکرد طبقه‌بندی نواحی اقلیمی کشاورزی بر اساس سه معیار شامل مجموع درجه روزهای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد، شاخص خشکی (نسبت بارندگی کل سالانه به مجموع کل تبخیر و تعرق بالقوه سالانه) شدت فصلی بودن درجه حرارت (انحراف معیار ماهانه درجه حرارت) انجام شد (van Bussel *et al.*, 2015) و در ادامه نواحی اقلیمی-کشاورزی[2] استان خراسان رضوی با اجرای آنالیز خوشه‌ای[3] بر روی معیارهای فوق تعیین گردید. با انجام این آنالیز به روش وارد[4] سه ناحیه اقلیمی-کشاورزی با تشابه بیشتر از ۷۵ درصد در استان خراسان رضوی از یکدیگر تفکیک شدند (شکل ۲).

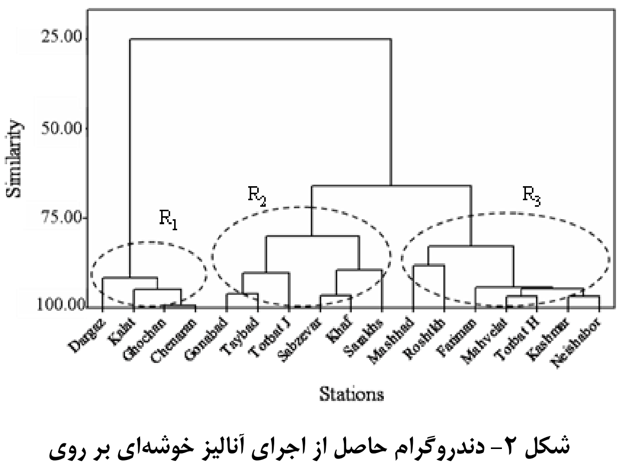
براساس داده‌های ۱۰ ساله ناحیه ۱ (R_1) شامل شهرهای درگز، کلات، قوچان و چناران دارای بیشترین میزان بارش و پایین‌ترین میانگین دمای ماهانه بوده، مجموع درجه روزهای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد در این ناحیه ۴۵۱۲ °C d و مقدار شاخص خشکی آن ۰/۳۱ است که بر اساس طبقه‌بندی متزگر و همکاران (Metzeger *et al.*, 2013) منطقه‌ای معتدل و نیمه‌خشک می‌باشد. ناحیه ۲ (R_2، شامل شهرهای گناباد، تایباد، تربت جام، سبزوار، خواف و سرخس) از بالاترین میانگین دما و کمترین میزان بارندگی برخوردار است، مجموع درجه روزهای رشد سالانه آن ۶۴۷۶ °C d بوده و با شاخص خشکی حدود ۰/۱۳ ناحیه‌ای گرم و خشک محسوب می‌شود. ناحیه ۳ (R_3، شهرهای مشهد، نیشابور، فریمان، تربت حیدریه، رشتخوار، مه ولات و کاشمر) در حد فاصل این دو ناحیه جای داشته و بر اساس شاخص‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی منطقه‌ای گرم و نیمه‌خشک می‌باشد. لازم به ذکر است که سه ناحیه از نظر میزان تشعشع تفاوت قابل توجهی ندارند (شکل ۳).

عملکرد واقعی

مقادیر عملکرد واقعی هریک از محصولات تحت بررسی (گندم و چغندر) برای دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸۴) شهرستان‌های واقع در هر ناحیه اقلیمی از سالنامه‌های آماری جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی جمع‌آوری شد، لازم به ذکر است که شهرستان‌های انتخاب شده در هر ناحیه اقلیمی بیش از ۸۵ درصد سطح زیر کشت محصولات تحت بررسی در کل ناحیه را دارا هستند. سپس عملکرد واقعی برای هر ناحیه اقلیمی با استفاده از معادله ۱ (Merlosa *et al.*, 2015) محاسبه شد:

$$Y_k = \sum_{j=1}^{n} (\mu_j \times \frac{a_j}{a_k}) \quad (۱)$$

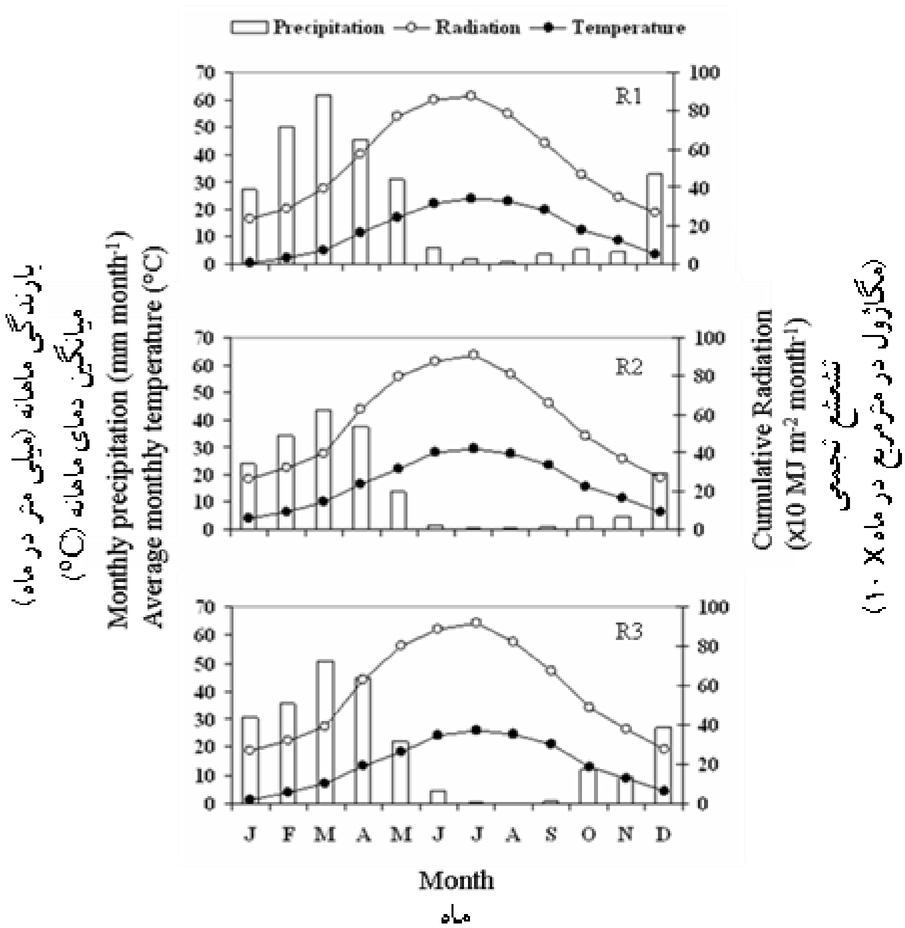
که در آن Y_k میانگین عملکرد واقعی محصول در ناحیه اقلیمی k، n تعداد شهرستان‌های ناحیه k، μ_j میانگین عملکرد واقعی محصول در شهرستان j، a_j سطح زیر کشت محصول در شهرستان j و a_k سطح زیر کشت محصول در کل ناحیه اقلیمی k می‌باشد. واضح است که با استفاده ار معادله ۱ می‌توان به سهولت عملکرد واقعی در مقیاس استان را نیز برآورد کرد.



شکل ۲- دندروگرام حاصل از اجرای آنالیز خوشه‌ای بر روی متغیرهای اقلیمی-کشاورزی شهرستان‌های استان خراسان رضوی و تفکیک ۳ ناحیه اصلی (R_1، R_2 و R_3)، خوشه‌بندی بر مبنای ۷۵ درصد تشابه انجام شده است.

Figure 2- Dendrogram of performing cluster analysis on agroclimatic variables of counties over Khorasan-Razavi province showing 3 separate homogenous regions (R_1, R_2 and R_3), clustering is based on 75% similarity

1- Atmospheric transmission
2- Agroclimatic
3- Cluster analysis
4- Ward method



شکل ۳- میانگین درجه حرارت ماهانه، مجموع بارندگی ماهانه و تشعشع تجمعی ماهانه در ۳ ناحیه اقلیمی-کشاورزی (R1-R3) استان خراسان رضوی

Figure 3- Average monthly temperature, cumulative monthly precipitation and cumulative monthly radiation in 3 agroclimatic regions (R1-R3) of Khorasan Razavi province

برآورد عملکرد پتانسیل

گندم آبی و چغندرقند: در این مطالعه عملکرد پتانسیل گندم و چغندر در کشت آبی با استفاده از مدل شبیه‌سازی LINTUL-1[1] برآورد شد. LINTUL-1 مدل ساده‌ای است که رشد سطح برگ، جذب نور، تولید ماده خشک و عملکرد محصولات زراعی را در شرایط پتانسیل شبیه‌سازی می‌کند فان دلدن (van Delden, 2001). در این مدل سرعت تولید ماده خشک ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$) از حاصل‌ضرب تشعشع جذب شده ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) در کارایی مصرف نور ($RUE,\ g\ MJ^{-1}$) محاسبه شده و سپس ماده خشک با الگویی که تابع مرحله نموی گیاه می‌باشد بین اندام‌ها (برگ، ساقه، ریشه و اندام ذخیره‌ای) تخصیص می‌یابد. شاخص سطح برگ (LAI) از تقسیم ماده خشک اختصاص‌یافته به برگ ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$) بر سطح ویژه برگ ($SLA,\ m^2\ g^{-1}$) محاسبه می‌شود و جذب نور به‌صورت تابعی نمایی از LAI و ضریب خاموشی نور (k) بر اساس معادله لامبرت-بیر برآورد می‌گردد. در این مطالعه کارآیی مصرف نور برای گندم ۱/۶۰ گرم بر مگاژول (Nassiri Mahallati *et al.*, 2011; O'Connell *et al.*, 2004) و برای چغندرقند ۱/۴۸ گرم بر مگاژول (Richter *et al.*, 2001; Parsa, 2008) منظور شده است. مراحل نمو شامل کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی تابع مجموع درجه روزهای رشد (TSUM, °C d) مورد نیاز برای هریک از این مراحل می‌باشد که بر اساس میانگین دمای روزانه و دمای حداقل (T_{base}) هر محصول محاسبه می‌شود. مراحل نموی فوق مربوط به گیاهان دانه‌ای (گندم) است و در مورد محصولاتی نظیر چغندر این مراحل به‌صورت کاشت تا سبز شدن؛ سبزشدن تا شروع رشد اندام ذخیره‌ای (غده) و

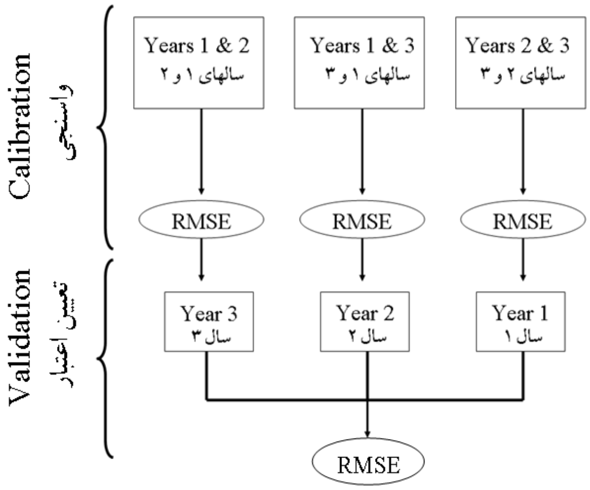
1- Light Interception and Utilization (LINTUL)

رشد غده تا رسیدگی تعریف می‌شود. ورودی‌های مدل داده‌های روزانه تشعشع خورشیدی، درجه حرارت حداقل و حداکثر در طی دوره رشد محصول می‌باشد. لازم به ذکر است که مدل LINTUL برای گندم بهاره طراحی شده و نیاز ورنالیزاسیون در آن در نظر گرفته نشده است، در این تحقیق فرآیند ورنالیزاسیون به روش ارائه شده توسط نصیری محلاتی و کوچکی (Nassiri Mahallati and Koocheki, 2007) در مدل تعریف گردید. گراسینی و همکاران (Grassini *et al.*, 2015) بیان داشتند که در اجرای پروتکل اطلس جهانی خلاء عملکرد برای انتخاب مدل شبیه‌سازی عملکرد محدودیتی وجود ندارد و در واقع مدل بر اساس میزان دسترسی به داده‌های مورد نیاز برای اجرای آن انتخاب می‌شود. انتخاب مدل LINTUL برای این مطالعه نیز به دلیل داده‌های ورودی نسبتاً محدود این مدل بوده و به‌علاوه این مدل قبلاً برای پیش‌بینی عملکرد گندم (Mondani, 2012) و چغندرقند (Parsa, 2010) در شرایط پتانسیل برای مشهد واسنجی و تعیین اعتبار شده است. باید توجه داشت که عملکرد پتانسیل در هر ناحیه اقلیمی برای بهترین رقم توصیه شده و مناسب‌ترین تاریخ کاشت در منطقه برآورد می‌شود (van Ittersum *et al.*, 2013). در این پژوهش ارقام توصیه شده گندم آبی و چغندرقند برای هر منطقه بر اساس اطلاعات افراد خبره شناسایی شد و بهترین تاریخ کاشت در هر ناحیه اقلیمی با اجرای مدل شبیه‌سازی در تاریخ‌های مختلف کاشت با فواصل ۱۵ روزه تا حصول به حداکثر عملکرد به‌دست آمد.

واسنجی و تعیین اعتبار متقابل مدل

پارامترهای مدل در جریان واسنجی برای هر سال در یک ناحیه مشخص اقلیمی به‌طور مستقل تصحیح شدند تا مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE[1]) در هر ناحیه به حداقل برسد. یعنی در هر ناحیه اقلیمی مدل برای هر سال واسنجی شد. از آنجا که داده‌های عملکرد مزارع آزمایشی یا پرمحصول مربوط به دوره ۱۰ ساله تحت بررسی اندک می‌باشند بنابراین در عمل تعیین اعتبار مدل به‌وسیله داده‌هایی مستقل از آنچه که در مرحله واسنجی به‌کار رفته امکان‌پذیر نخواهد بود. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های تعیین اعتبار متقابل[2] و از بین آنها تعیین اعتبار به روش "خارج کردن یک به یک"[3] (LOO) (Efron, 1983; Efron and Tibshirani, 1998) رایج می‌باشد. این روش برای واسنجی مدل با تعداد کم داده در سایر مطالعات نیز به‌کار رفته است (Irmak *et al.*, 2000; Jones and Carberry 1994; Xiong *et al.*, 2008). مدل باید بین سال‌ها نیز واسنجی و تعیین اعتبار شود زیرا تغییر شرایط محیطی در فصول مختلف ممکن است بر مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و قدرت پیش‌بینی مدل موثر باشد.

در روش LOO ابتدا مدل بر اساس مجموعه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد از n فصل زراعی n مرتبه به‌طور مستقل از هم واسنجی و تعیین اعتبار می‌شود. الگوریتم مربوط به تعیین اعتبار متقابل به روش LOO در شکل ۴ ارائه شده است. ابتدا مدل با داده‌های n-1 سال از n سال واسنجی و تعیین اعتبار می‌شود تا حداقل RMSE حاصل شود. برای مثال از ۳ سال داده عملکرد موجود برای یک ناحیه ۲ سال (سال‌های ۱ و ۲) برای واسنجی به‌کار رفته و RMSE مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، در این مرحله داده‌های سال ۳ خارج شده‌اند. سپس مدل مجدداً توسط داده‌های عملکرد سال‌های ۱ و ۳ (سال ۲ خارج می‌شود) واسنجی و تعیین اعتبار شده و نهایتا واسنجی و تعیین اعتبار با داده‌های سال‌های ۲ و۳ انجام و سال ۱ خارج می‌شود (شکل ۴). پس از اتمام مراحل واسنجی متقابل، مرحله تعیین اعتبار متقابل اجرا می‌شود. به این منظور مدل واسنجی شده با داده‌های سال‌های ۱ و ۲ با داده‌های سال ۳ که در مرحله واسنجی خارج بوده تعیین اعتبار می‌شود، فرآیند به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا داده‌های تمام n سال زراعی یک بار برای تعیین اعتبار به‌کار برده شوند (شکل ۴).



شکل ٤- مراحل اجرای واسنجی و تعیین اعتبار متقابل مدل به روش خارج کردن یک به یک (LOO) بر اساس داده‌های عملکرد مربوط به ۳ سال زراعی

Figure 4- Steps in cross calibration and validation of model using leave-one-out (LOO) method based on 3-year yield data.

سپس توانایی مدل واسنجی شده به روش LOO بر اساس میانگین ریشه مربعات خطای پیش‌بینی (RMSEP[4]) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (معادله ۲):

1- Root Mean Square Error
2- Cross validation
3- Leave-One-Out
4- Root Mean Square Error of Prediction

$$RMSEP = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(Ym_{ij} - Ys_{ij} \right)^2 \right]^{0.5} \qquad (۲)$$

که در آن Ym_{ij} عملکرد اندازه‌گیری شده برای j امین ناحیه در i امین سال از n سال زراعی می‌باشد که در LOO به‌کار رفته‌اند، Ys_{ij} عملکرد شبیه‌سازی شده برای j امین ناحیه که با استفاده از مدل واسنجی شده بدون سال i ام به‌دست آمده است.

به همین ترتیب تعیین اعتبار متقابل به روش LOO در همه نواحی اقلیمی به‌کار برده شده و با مقایسه RMSEP بین سه ناحیه می‌توان قابلیت مدل را در هر ناحیه برآورد و نتایج پیش‌بینی را مقایسه کرد به‌علاوه تغییرات زمانی (بین سال‌های زراعی) و مکانی (بین مناطق) عملکرد را نیز می‌توان مورد ارزیابی قرار داد. چون مدل با استفاده از داده‌های چند سال زراعی واسنجی شده بنابراین قابلیت پیش‌بینی مدل تا حد زیادی تابع این است که سال‌های زراعی تا چه اندازه تغییر ویژگی‌های اقلیمی را منعکس می‌کنند. بدیهی است که با افزایش تعداد سال‌ها قدرت مدل بهبود خواهد یافت.

تعیین اعتبار مدل هم بر اساس عملکردهای ثبت شده از مزارع پر محصول و هم از آزمایشات ایستگاهی در شرایط بهینه رشد انجام شد. این داده‌های عملکرد برای شهرستان‌های واقع در هر یک از سه ناحیه اقلیمی در فاصله سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۴ جمع‌آوری و توزیع احتمال آنها در هر ناحیه به روش ذکر شده توسط نصیری محلاتی و کوچکی (Nassiri Mahallati and Koocheki, 2019) تعیین گردید. با معلوم بودن احتمال عملکرد مزارع پر محصول، ۱۰ درصد بالای توزیع به‌عنوان برآوردی از عملکرد پتانسیل گندم و چغندرقند (عملکرد مشاهده شده) در هر ناحیه در نظر گرفته شد (van Ittersum *et al.*, 2013).

برآورد عملکرد پتانسیل گندم دیم

در این مطالعه عملکرد پتانسیل گندم دیم با برازش خط مرزی[1] یا تابع تولید مرزی[2] برآورد شد. برآورد تابع مرزی روشی آماری برای جدا کردن پاسخ هر متغیر مورد نظر (برای مثال عملکرد) به یک عامل خاص (برای مثال آب) در مجموعه‌ای از داده‌های عملکرد است که تحت تاثیر چندین عامل قرار دارند. در واقع خط مرزی نشان‌دهنده حداکثر عملکرد در پاسخ به عامل تحت بررسی می‌باشد. نقاط واقع بر روی این خط عملکرد پتانسیل در سطوح مختلف یک عامل و در غیاب سایر عوامل محدودکننده عملکرد هستند (Elliott and De Jong, 1993) و هر نقطه از داده‌های عملکرد که زیر خط مرزی قرار بگیرد توسط عوامل دیگری محدود شده است. مراحل برازش خط مرزی به‌طور خلاصه شامل: گروه‌بندی داده‌های عملکرد بر اساس مقادیر متغیر مستقل، خارج کردن نقاط پرت، مشخص ساختن داده‌هایی که نشان‌دهنده حداکثر عملکرد در هر سطح از عامل تحت بررسی هستند و برازش تابع به داده‌های حداکثر عملکرد می‌باشد (Shatar and McBratney, 2004). محققین توابع مختلفی را برای به‌دست آوردن خط مرزی ارائه کرده‌اند که رایج‌ترین آنها توابع خطی و چند جمله‌ای درجه دوم می‌باشند (Casanova *et al.*, 1999; Schnug *et al.*, 1996). در این پژوهش تابع تولید مرزی برای تخمین عملکرد پتانسیل در شرایط محدودیت آب بر اساس میزان بارندگی سالانه و عملکرد واقعی گندم دیم (عملکرد گزارش شده) و نیز عملکردهای ثبت شده از مزارع پر محصول و آزمایشات ایستگاهی در استان‌های خراسان رضوی و شمالی در هر سطح از بارندگی مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که استان خراسان شمالی در مقایسه با خراسان رضوی بارندگی بیشتری داشته و سطح اراضی و عملکرد گندم دیم در آن بیشتر است داده‌های این استان نیز به مجموعه داده‌ها اضافه گردید تا خط مرزی و عملکرد پتانسیل به‌طور دقیق‌تر برآورد شود.

تغییر مقیاس نتایج

در دستورالعمل اطلس جهانی خلاء عملکرد مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد پتانسیل در هر شهر ابتدا باید به ناحیه اقلیمی و سپس به استان تغییر مقیاس یافته یا به عبارت دیگر بزرگ مقیاس شود[3] (van Bussel *et al.*, 2015). به دلیل نوسان سالانه عملکرد پتانسیل برای پیش‌بینی آن در هر شهر (YP_{city}) باید میانگین مقادیر پیش‌بینی شده برای یک دوره زمانی شامل p سال محاسبه شود (معادله ۳) که حداقل طول این دوره ۱۰ سال است (Grassini *et al.*, 2015):

$$YP_{city} = \frac{\sum_{i=1}^{p} YP_{year_i}}{p} \qquad (۳)$$

سپس با استفاده از معادله ۴ (van Bussel *et al.*, 2015) عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده هر محصول در هر شهر (YP_{cityi}) بزرگ مقیاس شد تا عملکرد پتانسیل هر یک از نواحی اقلیمی (YP_{CZ}) به‌دست آید:

$$YP_{CZ} = \frac{\sum_{i=1}^{q} YP_{city_i} \times A_{city_i}}{\sum_{i=1}^{q} A_{city_i}} \qquad (۴)$$

که در آن q تعداد شهرهای واقع در هر ناحیه اقلیمی و A_{cityi} سطح زیر کشت محصول در هر شهر می‌باشد. در نهایت عملکرد پتانسیل هر محصول در کل استان ($YP_{province}$) با بزرگ مقیاس

1- Boundary line
2- Frontier production function

3- Up-scaling

کردن عملکرد پتانسیل در هر یک از c ناحیه اقلیمی متناسب با سطح زیر کشت محصول در آن ناحیه (A_{CZi}) به‌دست آمد (معادله ۵):

$$YP_{province} = \frac{\sum_{i=1}^{c} YP_{CZ_i} \times A_{CZ_i}}{\sum_{i=1}^{c} A_{CZ_i}} \quad (۵)$$

تخمین خلاء عملکرد

خلاء عملکرد (YG) محصولات تحت بررسی از اختلاف بین عملکرد پتانسیل (YP) و عملکرد واقعی (YA) برای هر ناحیه اقلیمی برآورد و سپس به کل استان تغییر مقیاس داده شد. مطالعات نشان داده است که حتی در بهترین شرایط تولید نیز عملکرد در سطحی پایین‌تر از عملکرد پتانسیل به ثبات می‌رسد زیرا پر کردن خلاء باقی‌مانده توجیه اقتصادی نخواهد داشت (Lobell *et al.*, 2009; Cassman *et al.*, 2010) این سطح که در حدود ۸۵ درصد عملکرد پتانسیل می‌باشد به خلاء قابل مهار[1] موسوم است (van Ittersum *et al.*, 2013). بر این اساس در این مطالعه خلاء قابل مهار ($YG_{85\%} = 0.85YP\text{-}YA$) نیز در مقیاس ناحیه اقلیمی و استان برای هر یک از محصولات و نیز روند ۱۰ ساله آن برآورد گردید.

نتایج و بحث

تعیین اعتبار متقابل مدل

نتایج تعیین اعتبار متقابل نشان داد که قدرت مدل در تخمین عملکرد گندم آبی و چغندرقند در هر سه ناحیه اقلیمی مطلوب می‌باشد (شکل ۵) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE٪) برای دو محصول تحت بررسی در هر سه ناحیه از ۱۳/۱ درصد تجاوز نکرد (جدول ۱).

عملکرد پتانسیل معمولاً با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی پیش‌بینی می‌شود و این مدل‌ها قبلاً باید بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین اعتبار شوند. در اغلب مطالعات داده‌های لازم برای تعیین اعتبار از آزمایشات ایستگاهی جمع‌آوری می‌شوند (Nassiri Mahallati and Koocheki, 2009). در حالی‌که بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل‌هایی که براساس داده‌های جمع‌آوری شده از کرت‌های آزمایشی واسنجی و تعیین اعتبار می‌شوند معمولاً در مقیاس‌های بزرگ به خوبی عمل نمی‌کنند و خطای پیش‌بینی آنها قابل توجه خواهد بود (De Wit *et al.*, 2005; Batchelor, 2002; Viglizzo *et al.*, 2004; Palosuo *et al.*, 2011). از سوی دیگر در روش ارائه شده توسط اطلس جهانی خلاء عملکرد در انتخاب مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی عملکرد پتانسیل محدودیتی وجود ندارد ولی اعتبارسنجی دقیق آن مورد تأکید قرار گرفته است (Grassini *et al.*, 2015). یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که تعیین اعتبار متقابل روش مناسب و نسبتاً ساده‌ای برای بهبود قدرت پیش‌بینی مدل در مطالعات مرتبط با ارزیابی خلاء عملکرد می‌باشد. این روش در پژوهش‌های مشابه نیز در کاهش خطای پیش‌بینی مدل‌ها با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است (Xiong *et al.*, 2008; Thorp *et al.*, 2007).

عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد چغندرقند

میانگین ۱۰ ساله عملکرد واقعی چغندرقند در استان ۳۴/۲ تن در هکتار برآورد شد، این مقدار در سه ناحیه اقلیمی اختلافی در حدود ۱/۵ تن در هکتار داشت و بالاترین عملکرد واقعی (۳۶/۴ تن در هکتار) مربوط به ناحیه ۳ بود (جدول ۲). ضریب تغییرات عملکرد این محصول در نواحی اقلیمی و در کل استان پایین و بین ۱۲-۹ درصد قرار دارد. بیشترین و کمترین عملکرد پتانسیل چغندرقند براساس نتایج ۱۰ ساله به میزان ۸۷/۷ و ۷۸/۶ تن در هکتار به‌ترتیب در ناحیه ۳ و ۲ و میانگین این عملکرد در کل استان ۸۳/۹ تن در هکتار به‌دست آمد.

بر اساس این نتایج میانگین ۱۰ ساله خلاء عملکرد چغندرقند در استان خراسان رضوی ۴۹/۷ تن در هکتار و به‌طور نسبی معادل ۵۹ درصد عملکرد پتانسیل می‌باشد به بیان دیگر عملکرد واقعی این محصول در استان تنها ۴۱ درصد از عملکرد پتانسیل است. بیشترین خلاء نسبی عملکرد چغندر به میزان ۶۰ درصد مربوط به ناحیه ۳ و در دو ناحیه دیگر بین ۵۶ تا ۵۷ درصد می‌باشد (جدول ۲).

خلاء قابل مهار عملکرد (خلاء ۸۵٪) این محصول در کل استان ۳۷/۱ تن در هکتار است که بر این اساس در عمل ۴۸ درصد از عملکرد قابل مهار توسط کشاورزان تولید می‌شود، البته میانگین ۱۰ ساله این مقدار در نواحی اقلیمی استان متفاوت است و در ناحیه ۲ در حدود ۵۲ درصد از عملکرد قابل مهار تحقق‌یافته که بالاترین مقدار بین سه ناحیه می‌باشد (جدول ۲).

تغییرات زمانی عملکرد پتانسیل چغندرقند ($YP_{85\%}$) نشان می‌دهد که این عملکرد در هر ۳ ناحیه اقلیمی استان بدون روند بوده و تنها نوسان سالانه اندکی در آن مشهود است (شکل ۶). البته خلاء قابل مهار (خلاء ۸۵٪) عملکرد این محصول در طی این دوره در حال پر شدن می‌باشد و مقدار آن که در ابتدای دوره تقریباً ۴۰ تن در هکتار بوده در سال‌های انتهایی دوره به حدود ۲۰ تن در هکتار رسیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که خلاء قابل مهار در نواحی اقلیمی ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب ۰/۸۳، ۱/۱، ۱/۴۴ تن در هکتار در سال کاهش یافته است (شکل a6، b6 و c6) لازم به ذکر است که در شکل مقدار خلاء عملکرد به‌صورت منفی نمایش داده شده و در نتیجه مقدار صفر به معنی پر شدن کامل این خلاء می‌باشد. بر این اساس خلاء نسبی عملکرد ($YG_{85\%}/YP_{85\%}$) نیز در طی دوره ۱۰ ساله تحت بررسی در هر سه ناحیه اقلیمی استان روند کاهشی معنی‌داری داشته و

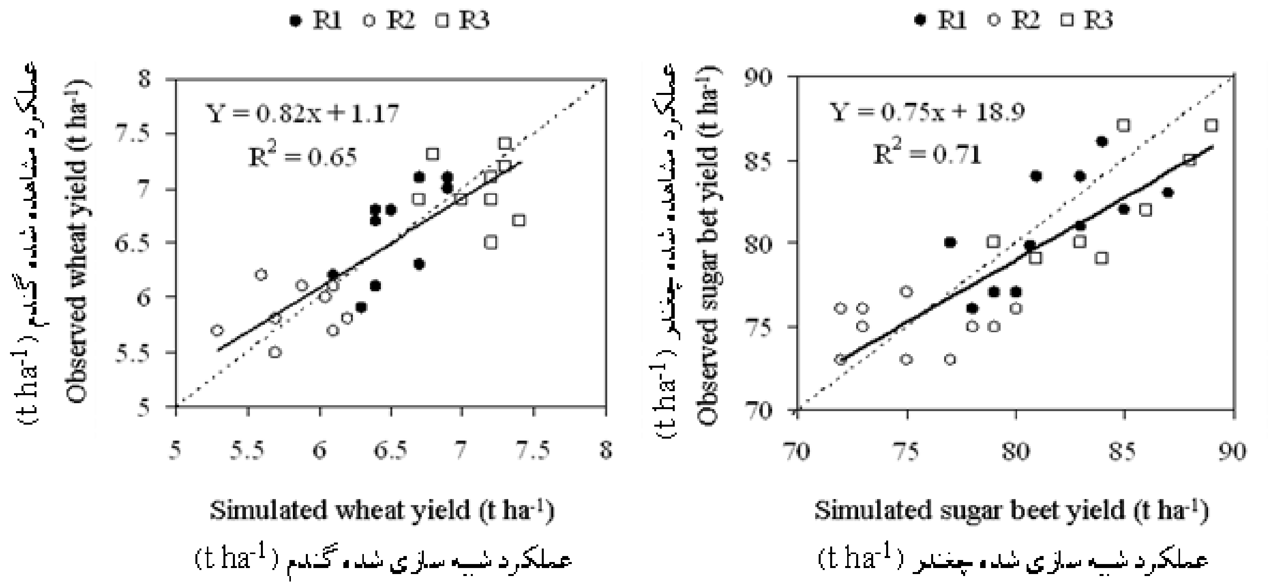
1- Exploitable gap

در پایان دوره (سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳) بـه‌طـور متوسـط ۴۰ درصـد می‌باشد (شکل d6، e6 و f6)، به بیان دیگر عملکرد واقعی چغندرقنـد در استان به حدود ۶۰ درصد عملکرد پتانسیل قابل مهار این محصول رسیده است.

جدول ۱- مقایسه مقادیر درصدی جذر میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSE٪) برای عملکرد گندم آبی و چغندر در سه ناحیه اقلیمی کشاورزی خراسان پس از تعیین اعتبار مدل در سطح کرت آزمایشی و پس از تعیین اعتبار متقابل

Table 1- Comparison of percentage root mean squared error of prediction (RMSE%) for irrigated wheat and sugar beet yield in 3 agroclimatic regions of Khorasan Razavi after validation of model at plot level and after cross validation

	Region 1 ناحیه ۱	Region 2 ناحیه ۲	Region 3 ناحیه ۳
		Wheat گندم	
Plot validated model تعیین اعتبار در کرت	19.2	18.4	18.7
Cross validated model تعیین اعتبار متقابل	11.3	10.6	11.1
Δ RMSE	7.9	7.8	7.6
		Sugar beet چغندرقند	
Plot validated model تعیین اعتبار در کرت	20.5	19.7	19.1
Cross validated model تعیین اعتبار متقابل	13.1	12.1	12.6
Δ RMSE	7.4	7.6	6.5



شکل ۵- تعیین اعتبار متقابل مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد گندم و چغندرقند در ۳ ناحیه اقلیمی کشاورزی استان خراسان رضوی (R1, R2, R3). در مورد هر دو محصول شیب خط رگرسیون تفاوت معنی‌داری با خط ۱:۱ (خط نقطه‌چین) ندارد.

Figure 5- Cross validation of observed and simulated yields of wheat and sugar beet in 3 agroclimatic regions (R1, R2, R3) of Khorasan Razavi province. For both crops the slope of regression lines was not significantly different from 1:1 line (dotted line).

جدول ۲- میانگین عملکرد واقعی و ضریب تغییرات (CV) آن و مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد پتانسیل، خلاء عملکرد و خلاء نسبی عملکرد چغندرقند طی دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸٤) در ۳ ناحیه اقلیمی کشاورزی استان خراسان رضوی و تغییر مقیاس نتایج به کل استان

Table 2- Mean actual yield and its coefficient of variation (CV) and simulated values of potential yield, yield gap and relative yield gap for sugar beet during a 10-year period (1384-1393) in 3 agroclimatic regions of Khorasan Razavi province and up-scaled results to the whole province

		Region 1 ناحیه ۱	Region 2 ناحیه ۲	Region 3 ناحیه ۳	Province استان
		Sugar beet چغندرقند			
Actual yield (YA kg ha^{-1})	عملکرد واقعی	36.4	34.8	34.9	34.2
CV (%)	ضریب تغییرات (%)	9.5	11.9	10.8	9.2
Potential yield (YP kg ha^{-1})	عملکرد پتانسیل	84.9	78.6	87.7	83.9
Yield gap (YG kg ha^{-1})	خلاء عملکرد	48.5	43.8	52.8	49.7
Relative gap	خلاء نسبی	0.57	0.56	0.60	0.59
Yield gap$_{85\%}$ (YG$_{85\%}$ kg ha^{-1})	خلاء عملکرد (۸۵٪)	35.8	32.0	39.6	37.1
Relative gap (85%)	خلاء نسبی (۸۵٪)	0.50	0.48	0.53	0.52

در ایران مطالعات اندکی در مورد برآورد عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد چغندرقند اجرا شده است برای مثال پارسا (Parsa, 2005) با استفاده از مدل شبیه‌سازی LINTUL عملکرد پتانسیل این محصول در استان خراسان رضوی را ۱۱۰ تن در هکتار به‌دست آورد و بر این اساس خلاء عملکرد آن در حدود ۷۰ درصد پیش‌بینی شد. دیهیم فرد و همکاران (Deihimfard *et al.*, 2015b) نیز با به‌کارگیری مدل SUCROS عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد چغندرقند در استان خراسان رضوی را به‌ترتیب ۱۰۰ و ۶۸ تن در هکتار برآورد کردند که بر این اساس عملکرد واقعی این محصول در استان تنها ۳۲ درصد از عملکرد پتانسیل آن می‌باشد.

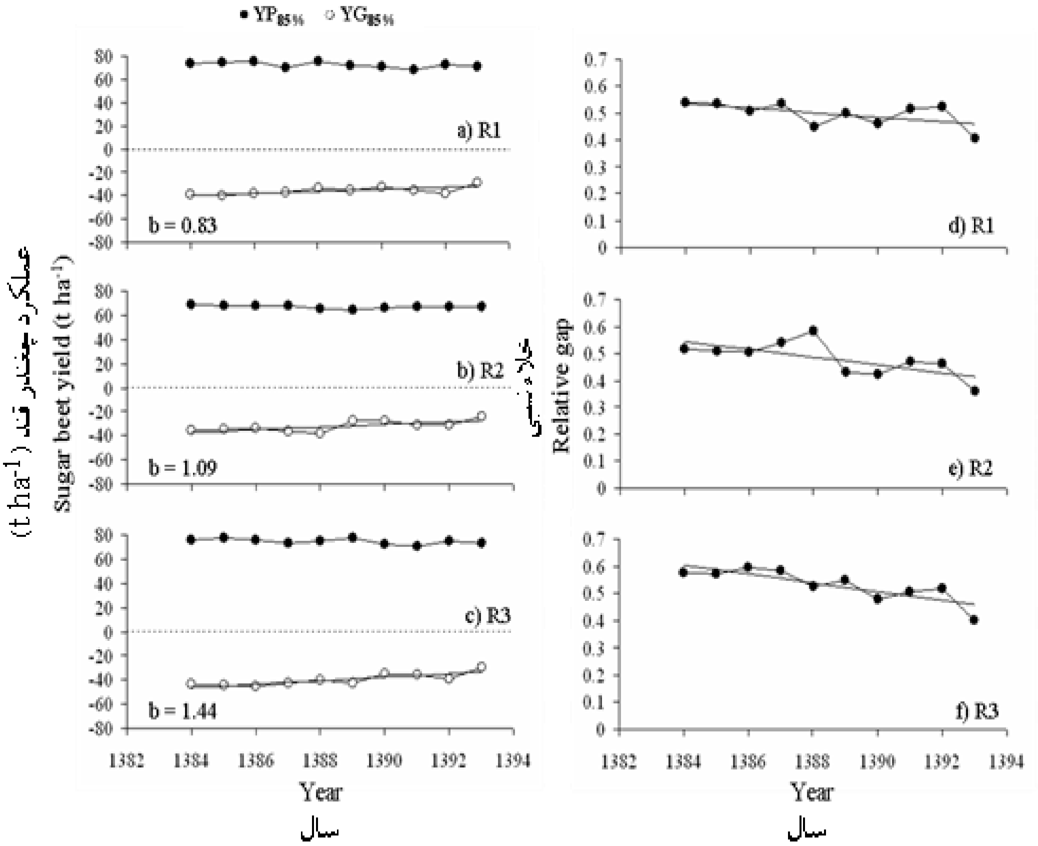
نتایج این محققین با یافته‌های پژوهش حاضر تفاوت قابل توجهی دارد که دلیل آن عمدتاً مربوط به روش مطالعه است. در هر دو تحقیق فوق مدل شبیه‌سازی در مقیاس کرت‌های آزمایشی واسنجی و تعیین اعتبار شده و بدیهی است که پیش‌بینی چنین مدلی در مقیاس منطقه‌ای با خطا همراه خواهد بود در حالی‌که در این پژوهش پیش‌بینی‌ها پس از واسنجی و تعیین اعتبار متقابل مدل در مقیاس بزرگ انجام شده و در نتیجه از دقت بالاتری برخوردار است.

به‌علاوه بر اساس پروتکل پیشنهادی اطلس جهانی خلاء عملکرد که در این مطالعه به‌کار گرفته شد، جهت پیش‌بینی عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد در مقیاس منطقه‌ای یا ملی ابتدا باید نواحی اقلیمی کشاورزی تعیین و سپس میانگین طولانی مدت این مقادیر (حداقل ۱۰ ساله) در هر ناحیه برآورد شود تا تغییرات مکانی و زمانی خلاء ظاهر گردد (van Bussel *et al.*, 2015; van Wart *et al.*, 2013).

میانگین جهانی عملکرد چغندرقند در سال ۲۰۱۵ در حدود ۵۲ تن در هکتار بوده و کشورهای اروپایی بالاترین عملکردها را در اختیار دارند که در میان آنها فرانسه با میانگین عملکرد ۸۸ تن در هکتار در صدر قرار دارد (FAOSTAT, 2015) در حالی‌که در آمار وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۳ (MJA, 2015) میانگین عملکرد این محصول در کشور ۴۷/۸ و در استان خراسان رضوی ۴۳/۴ تن در هکتار گزارش شده که در حدود ۲۰ درصد کمتر از میانگین جهانی می‌باشد.

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که برای رسیدن میانگین عملکرد استان به سطح جهانی باید حداقل ۲۵ درصد از خلاء فعلی عملکرد چغندرقند از طریق بهبود عملیات زراعی پر شود. باید توجه داشت تا زمانی‌که عملکرد واقعی تفاوت قابل توجهی با عملکرد پتانسیل داشته باشد خلاء عملکرد عمدتاً ناشی از روش‌های مدیریت بوده و افزایش پتانسیل ژنتیکی ارقام تاثیر چندانی در افزایش عملکرد واقعی نخواهد داشت (Hall *et al.*, 2013; Espe, 2016).

عملکرد چغندرقند به‌شدت تابع میزان تشعشع جذب شده در طی فصل رشد است در این محصول رشد اولیه کانوپی سریع بوده و معمولاً پوشش زمین در فاصله ۵۰ روز بعد از سبز شدن کامل می‌شود به‌علاوه در شرایط مطلوب رشد، دوام کانوپی طولانی است و در حدود ۱۰۰ روز به‌طول می‌انجامد و در انتهای دوره رشد نیز پوشش کانوپی در حدود ۷۰ می‌باشد (Werker and Jaggard, 1998).



شکل ٦- عملکرد پتانسیل ($YP_{85\%}$) و خلاء قابل مهار ($YG_{85\%}$) عملکرد چغندرقند در سه ناحیه اقلیمی کشاورزی استان خراسان رضوی (a-c) همراه با خلاء نسبی عملکرد (d-f) در طی دوره ۱۰ ساله ۱۳۹۳-۱۳۸٤. مقادیر خلاء عملکرد به‌صورت منفی نشان داده شده است تا سرعت پر شدن خلاء ($b, t\ ha^{-1}\ y^{-1}$) در طی دوره تحت بررسی مشخص شود.

Figure 6– Potential yield ($YP_{85\%}$) and exploitable yield gap ($YG_{85\%}$) of sugar beet in 3 agroclimatic regions of Khorasan Razavi province (a-c) and relative gap (d-f) during 1384-1393 periods. Yield gap is presented as negative values to show the rate of gap filling ($b, t\ ha^{-1}\ y^{-1}$) during the studied period

تنظیم تاریخ کاشت از جمله روش‌های زراعی می‌باشد که در گیاهانی که رشد رویشی آنها مورد توجه است و به‌ویژه در چغندرقند نقش مهمی در جذب نور و شکل‌گیری عملکرد دارد (Kenter *et al.*, 2006). نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در تاریخ کاشت بهینه مجموع تشعشع جذب شده توسط کانوپی چغندرقند در مناطق مختلف اقلیمی استان خراسان بین ۱۹۰۰-۱۷۰۰ مگاژول در متر مربع است. با محاسبات ساده‌ای (Nassiri Mahallati and Koocheki, 2019) می‌توان تخمین زد که در شرایط پتانسیل میزان ماده خشک تولیدی با این مقدار تشعشع جذب شده و کارآیی مصرف نور ۱/۴۸ گرم بر مگاژول بین ۲۸-۲۵ تن در هکتار است که با احتساب شاخص برداشت ۸۰ درصد و درصد ماده خشک، معادل عملکرد غده به میزان ۸۰ تا ۹۰ تن در هکتار می‌باشد و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی (جدول ۲) نیز قابل مقایسه است. البته عملکرد پتانسیل چغندرقند نسبت به تغییر تاریخ کاشت حساس بوده و با تاخیر در کشت به‌ویژه بعد از نیمه اردیبهشت در تمام نواحی اقلیمی استان کاهش می‌یابد بنابراین به‌نظر می‌رسد تنظیم دقیق تاریخ کاشت روش مدیریتی مناسبی در کاهش خلاء عملکرد این محصول باشد. در همین ارتباط کشت پاییزه چغندرقند که در سال‌های اخیر با تشدید اثرات گرمایشی تغییر اقلیم مورد توجه محققین کشور و استان خراسان رضوی قرار گرفته و در مناطق مدیترانه‌ای و برخی کشورهای اروپایی نیز موفقیت‌آمیز بوده است (Jaggard and Werker,1999; Kluge-Severin *et al.*, 2009) راهکار موثری برای بهبود جذب تشعشع و افزایش عملکرد به منظور پر کردن خلاء فعلی محسوب می‌شود. شواهد آزمایشی نشان داده است که در کشت پاییزه علاوه بر جذب بیشتر تشعشع، کارآیی مصرف نور چغندرقند نیز در حدود ۱۰ درصد بالاتر از کشت بهاره است (Hoffmann and Kluge-Severin, 2010). البته علی‌رغم اصلاح ارقام مقاوم به بولتینگ بروز یخبندان‌های ناگهانی و شدید که افزایش فراوانی آنها از ویژگی‌های تغییر اقلیم محسوب می‌شود باعث

افزایش ریسک در کشت پاییزه چغندر قند خواهد شد.

عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد گندم آبی

میانگین ۱۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸۴) عملکرد پتانسیل گندم آبی در نواحی اقلیمی ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب ۷۲۴۸، ۶۴۷۴ و ۷۸۵۲ کیلوگرم در هکتار برآورد شد در حالی‌که در طی همین دوره میانگین عملکرد واقعی این ۳ ناحیه به‌ترتیب ۲۸۹۰، ۲۷۱۰ و ۲۹۵۰ کیلوگرم در هکتار بوده است (جدول ۳). بنابراین خلاء عملکرد در هر سه ناحیه بزرگ و در دامنه‌ای بین ۴۹۰۰-۳۷۰۰ کیلوگرم در هکتار قرار دارد و مقدار نسبی این خلاء یا به بیان دیگر بخشی از عملکرد پتانسیل که هنوز تحقق نیافته است بین ۰/۵۸ تا ۰/۶۳ می‌باشد به‌علاوه نواحی اقلیمی ۳ و ۲ به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین خلاء عملکرد هستند. تغییر مقیاس نتایج از نواحی اقلیمی به کل استان نشان داد که عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد این محصول در خراسان رضوی به‌ترتیب ۶۹۳۶ و ۴۰۶۱ کیلوگرم در هکتار است و درنتیجه عملکرد واقعی تنها ۴۱ درصد از عملکرد پتانسیل می‌باشد (جدول ۳). البته خلاء قابل مهار عملکرد گندم آبی (خلاء ۸۵٪) در کل استان ۵۱ درصد عملکرد پتانسیل بوده و مقدار نسبی آن در نواحی سه‌گانه اقلیمی نیز بین ۵۱ (ناحیه ۲) تا ۵۶ درصد (ناحیه ۳) می‌باشد.

جدول ۳- میانگین عملکرد واقعی و ضریب تغییرات (CV) آن و مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد پتانسیل، خلاء عملکرد و خلاء نسبی عملکرد گندم آبی طی دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸٤) در ۳ ناحیه اقلیمی کشاورزی استان خراسان رضوی و تغییر مقیاس نتایج به کل استان

Table 3- Mean actual yield and its coefficient of variation (CV) and simulated values of potential yield, yield gap and relative yield gap for irrigated wheat during a 10-year period (1384-1393) in 3 agroclimatic regions of Khorasan Razavi province and up-scaled results to the whole province

		Province استان	Region 3 ناحیه ۳	Region 2 ناحیه ۲	Region 1 ناحیه ۱
		Irrigateded wheat گندم آبی			
Actual yield (YA kg ha^{-1})	عملکرد واقعی	2893	2710	2951	2875
CV (%)	ضریب تغییرات (٪)	19.3	22.0	16.7	18.9
Potential yield (YP kg ha^{-1})	عملکرد پتانسیل	7248	6474	7852	6936
Yield gap (YG kg ha^{-1})	خلاء عملکرد	4409	3764	4937	4061
Relative gap	خلاء نسبی	0.61	0.58	0.63	0.59
Yield gap$_{85\%}$ (YG$_{85\%}$ kg ha^{-1})	خلاء عملکرد (۸۵٪)	3268	2792	3723	3021
Relative gap (85%)	خلاء نسبی (۸۵٪)	0.53	0.51	0.56	0.51

طی سال‌های اخیر خلاء عملکرد گندم آبی در برخی مناطق کشور مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای مثال نصیری محلاتی و کوچکی (Nassiri Mahallati and Koocheki, 2009) میانگین عملکرد پتانسیل گندم و خلاء آن در استان خراسان رضوی را طی سال‌های ۸۵-۱۳۷۵ به‌ترتیب ۶/۹ و ۴/۳ تن در هکتار پیش‌بینی کردند که این خلاء ۶۳ درصد عملکرد پتانسیل بود البته بر اساس نتایج تحقیق حاضر در فاصله سال‌های ۹۳-۱۳۸۴ میانگین خلاء نسبت به دوره ۱۰ ساله قبلی تنها ۴ درصد کاهش یافته است. دیهیم فرد و همکاران (Deihimfard *et al.*, 2015a) عملکرد پتانسیل گندم آبی در کل استان خراسان را ۷/۸ و خلاء آن را ۵/۲ تن در هکتار برآورد کردند که نشان می‌دهد عملکرد واقعی استان در حدود ۳۳ درصد پتانسیل آن می‌باشد لازم به ذکر است که این ارزیابی تنها مربوط به یک سال (سال انجام مطالعه) و هر سه استان خراسان می‌باشد در حالی‌که بر مبنای میانگین ۱۰ ساله، عملکرد واقعی استان خراسان رضوی به ۴۱ درصد پتانسیل رسیده است (جدول ۳). قرینه و همکاران (Gharineh *et al.*, 2009) با استفاده از مدل WOFOST پتانسیل عملکرد گندم آبی در استان خوزستان را طی دوره‌ای ۱۳ ساله بین ۷۵۳۹ تا ۹۲۴۵ کیلوگرم در هکتار و خلاء عملکرد را ۵۰۶۹-۳۱۳۸ کیلوگرم در هکتار معادل ۴۱/۶ تا ۶۵/۸ درصد عملکرد پتانسیل تخمین زدند. طائی سمیرمی و همکاران (Taei Semiromi *et al.*, 2012) با ارزیابی بوم‌نظام‌های گندم حوضه آبریز بروجن پتانسیل عملکرد گندم آبی این منطقه را بر اساس پیش‌بینی مدل WOFOST بین ۶/۴-۲/۲ تن در هکتار و خلا عملکرد در این حوضه را در دامنه ۶/۲-۴/۲ تن در هکتار به‌دست آوردند. سید جلالی و همکاران (Seyed Jalali *et al.*, 2012) نیز پتانسیل عملکرد گندم آبی در منطقه عقیلی استان خوزستان را با استفاده از روش فائو بسته به نوع مدیریت بین ۲۲۰۰ تا ۶۷۰۰ کیلوگرم در هکتار برآورد کردند. باوجودی‌که این مطالعات در مقیاس منطقه‌ای اجرا شده‌اند ولی بر مبنای مجموعه این نتایج به‌نظر می‌رسد که پتانسیل عملکرد گندم آبی در کشور در دامنه ۷/۵-۶/۵ تن در هکتار قرار داشته و با توجه به

میانگین عملکرد این محصول در کشور (تقریباً ۳ تن در هکتار) خلاء عملکرد گندم آبی در مقیاس ملی قابل توجه و در محدوده ۵۵ تا ۶۰ درصد عملکرد پتانسیل می‌باشد. باید توجه داشت که تحقق کامل عملکرد پتانسیل به دلیل بازده نزولی عملکرد در پاسخ به کود و سایر منابع تولید مستلزم مصرف مقادیر بیشتری از نهاده‌ها خواهد بود که این امر از نظر کشاورزان به لحاظ اقتصادی و از نظر برنامه‌ریزان به لحاظ زیست‌محیطی قابل پذیرش نمی‌باشد و شواهد موجود تیز نشان داده که در پیشرفته‌ترین بوم‌نظام‌های زراعی نیز عملکرد واقعی در ۸۵ درصد عملکرد پتانسیل به ثبات رسیده است (Lobell *et al*., 2009; Koning and van Ittersum, 2009; Grassini *et al*., 2011). البته حتی بر اساس خلاء ۸۵ درصد نیز مشابه آنچه برای خراسان رضوی ارائه شد (جدول ۳) در حال حاضر تنها ۵۰ درصد از پتانسیل عملکرد گندم آبی کشور در عمل تحقق یافته است.

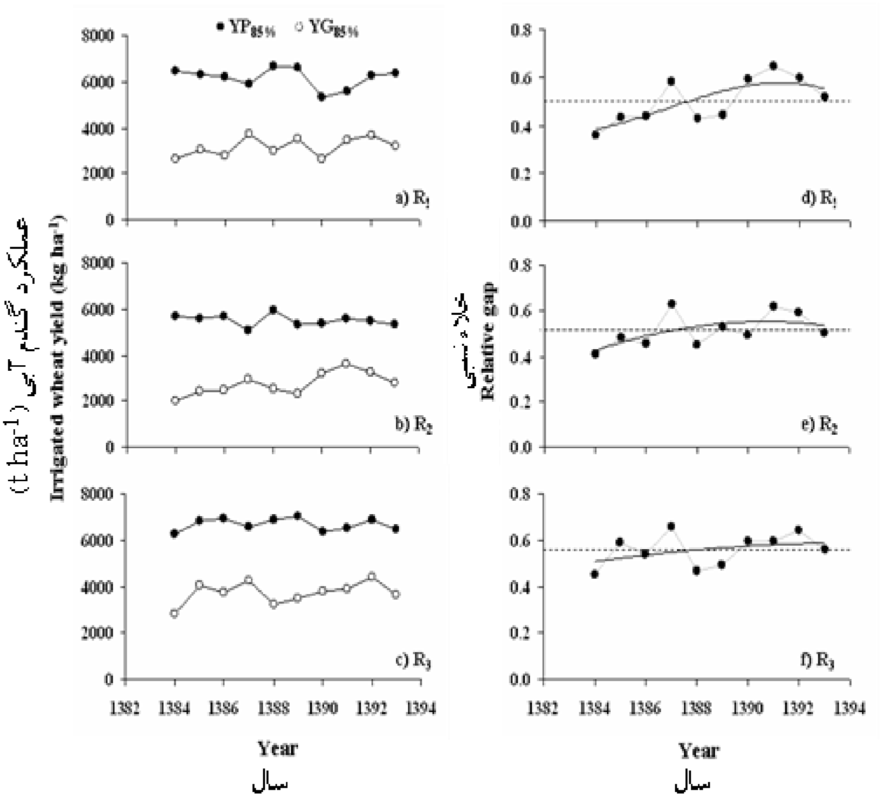
در شکل‌های a7 تا c7 تغییرات ۱۰ ساله عملکرد پتانسیل ($YP_{85\%}$) و خلاء قابل مهار عملکرد ($YG_{85\%}$) گندم آبی در نواحی اقلیمی کشاورزی استان ارائه شده است. عملکرد پتانسیل در هیچ‌یک از سه ناحیه روند معنی‌داری را نشان نداد. خلاء عملکرد علی‌رغم نوسان سالانه، در ابتدای دوره نسبتاً پایین بود ولی در ادامه افزایش یافت و در هر سه ناحیه اقلیمی از ۴ تن در هکتار نیز تجاوز کرد البته در سال‌های انتهایی دوره نشانه‌هایی از کاهش خلاء مشهود می‌باشد. بر این اساس خلاء نسبی عملکرد که در ابتدای دوره بین ۴۵–۳۵ درصد بود در میانه دوره ۱۰ ساله به ۶۰–۵۵ درصد رسید و در پایان دوره ۵۰ درصد می‌باشد این شواهد نشان می‌دهد که روند تغییرات خلاء عملکرد گندم در استان خراسان رضوی خطی نبوده و با فرم درجه ۲ انطباق بهتری دارد (شکل‌های d7 تا f7).

به‌طور کلی انتظار می‌رود عملکرد پتانسیل در طی زمان با شیبی مثبت که نشان‌دهنده پتانسیل ژنتیکی عملکرد ارقام اصلاح شده جدید است افزایش یابد (Fischer *et al*., 2015; van Ittersum *et al*., 2013)، البته باید توجه داشت که برای تعیین دقیق این شیب عملکرد پتانسیل باید بر اساس سال آزادسازی ارقام بررسی شود. برای مثال کوچکی و نصیری محلاتی (Koocheki and Nassiri Mahallati, 2019) با ارزیابی ارقام آزاد شده در فاصله سال‌های ۹۰–۱۳۴۷ نشان دادند که پتانسیل ژنتیکی ارقام گندم آبی کشور به میزان ۵۷ کیلوگرم در هکتار در سال افزایش یافته است با این وجود در تحقیق حاضر عملکرد پتانسیل گندم در استان روند معنی‌داری نشان نداد (شکل ۶) که احتمالاً به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات دقیق در مورد ارقام کشت شده در طی دوره ۱۰ ساله در هر ناحیه اقلیمی می‌باشد. در همین ارتباط دیهیم فرد و همکاران (Deihimfard *et al*., 2015a) با مقایسه ۳ رقم گندم در مناطق مختلف استان خراسان نشان دادند که میانگین عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شده ارقام تا ۲ تن در هکتار تفاوت داشت. با وجودی‌که در تحقیق حاضر ارقام گندم زیر کشت در سال‌های گذشته بر اساس نظر محققین مرکز تحقیقات کشاورزی استان تعیین شدند ولی به هر حال هر گونه خطا در این اطلاعات دقت پیش‌بینی عملکرد پتانسیل را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

از سوی دیگر عملکرد پتانسیل ممکن است تحت تاثیر تغییر شرایط اقلیمی نیز قرار گیرد، این تغییرات می‌تواند مانع از تحقق پتانسیل ژنتیکی ارقام شده و گاه نیز باعث بهبود آن شود (Hall and Richards, 2013; Neumann *et al*., 2010). برای مثال هاچمن و همکاران (Hochman *et al*., 2016) بیان داشتند کاهش میزان بارش سالانه باعث کاهش عملکرد پتانسیل ارقام پر محصول گندم دیم در استرالیا شده است در حالی‌که جاگارد و همکاران (Jaggard *et al*., 2010) نشان دادند که افزایش پتانسیل عملکرد چغندرقند در انگلستان از ابتدای قرن اخیر عمدتاً ناشی بهبود شرایط اقلیمی به‌ویژه درجه حرارت فصل بهار به دلیل گرمایش جهانی بوده و اصلاح ارقام نقشی در آن نداشته است.

با وجود ثابت بودن روند تغییرات عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی گندم آبی استان در حدود ۵۰ درصد این پتانسیل است. تا زمانی که عملکرد واقعی تفاوت قابل توجهی با پتانسیل محیطی داشته باشد روش‌های مدیریتی راهکار اصلی برای پرکردن خلاء عملکرد می‌باشند و اهمیت روش‌های اصلاح نباتات در صورتی برجسته خواهد بود که خلاء عملکرد به صفر نزدیک شود (Fischer, 2015; Espe *et al*., 2016). بنابراین بر اساس یافته‌های این تحقیق تنظیم عملیات مدیریت زراعی راهکار اصلی در جهت کاهش خلاء عملکرد گندم آبی در استان محسوب می‌شوند. در همین ارتباط دیهیم فرد و همکاران (Deihimfard *et al*., 2015a) نشان دادند که خلاء عملکرد گندم در استان خراسان عمدتاً مبنای مدیریتی داشته و بین ۵۰ تا ۶۰ درصد از این خلاء مربوط به مدیریت نیتروژن و آب می‌باشد. سلطانی و همکاران (Soltani *et al*., 2016) نیز نشان دادند که با روش‌های مدیریتی می‌توان خلاء عملکرد نخود در کشور را تا ۷۵ درصد کاهش داد.

علی‌رغم معنی‌دار نبودن روند تغییرات عملکرد پتانسیل، نوسان سالانه آن قابل توجه و بین ۰/۱ تا ۲ تن در هکتار می‌باشد (شکل‌های a7، b7 و c7). نوسان عملکرد پتانسیل در طی زمان در سایر مطالعات نیز گزارش شده است برای مثال آبلدو و همکاران (Abeledo *et al*., 2008) تغییرات عملکرد پتانسیل گندم در آرژانتین را در طی دوره‌ای ۱۷ ساله بین ۳/۵ تا ۸ تن در هکتار گزارش کردند. این محققین نشان دادند که تغییرات سال به سال میانگین تشعشع روزانه در فاصله کاشت تا گرده‌افشانی دلیل اصلی نوسان عملکرد پتانسیل گندم بوده است.



شکل ۷- عملکرد پتانسیل ($YP_{85\%}$) و خلاء عملکرد ($YG_{85\%}$) گندم آبی درسه ناحیه اقلیمی کشاورزی استان خراسان رضوی (a-c) همراه با خلاء نسبی عملکرد ($YG_{85\%}/YPG_{85\%}$) در این سه ناحیه (e-f) در طی دوره ده ساله ۱۳۹۳-۱۳۸٤

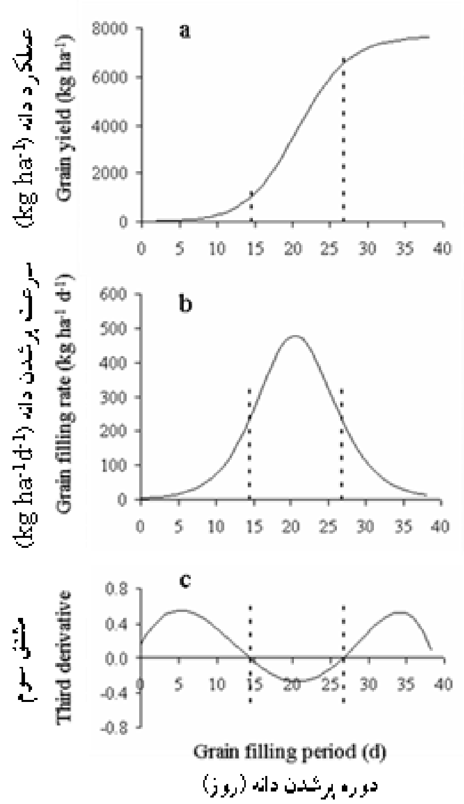
Figure 7- Potential yield ($YP_{85\%}$) and yield gap ($YG_{85\%}$) of irrigated wheat in 3 agroclimatic regions of Khorasan Razavi province (a-c) and relative gap ($YG_{85\%}/YP_{85\%}$) in the studied regions (e-f) during 1384-1393 period

البته در مطالعه حاضر تغییر قابل توجهی از نظر میزان تشعشع بین سال‌های مختلف مشاهده نشد بنابراین به‌نظر می‌رسد که عوامل دیگری در تغییرات سالانه YP گندم آبی (شکل ۷) موثرند. طول دوره پرشدن دانه نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد غلات دارد در این ارتباط دیونورا و کراپف (Dionora and Kropff, 1995) در مطالعه‌ای بر روی برنج نشان دادند که طول دوره موثر پر شدن دانه[1] (EGFP) یعنی مدت زمانی‌که تجمع ماده خشک در دانه به‌صورت خطی افزایش می‌یابد تعیین‌کننده پتانسیل عملکرد در ارقام برنج می‌باشد. دینگکوهن و همکاران (Dingkuhn *et al.*, 2015) نیز EGFP را عامل مهمی در شکل‌گیری عملکرد پتانسیل در برنج ذکر کردند. بر این اساس با استفاده از نتایج شبیه‌سازی تاثیر طول دوره پرشدن دانه بر تغییرات عملکرد پتانسیل گندم آبی در استان خراسان مورد بررسی قرار گرفت. مدل LINTUL روند تجمع ماده خشک در دانه (عملکرد دانه، کیلوگرم در هکتار) را با فواصل یک روزه شبیه‌سازی می‌کند. با برازش نابع سیگموییدی به این داده‌ها (شکل a8) می‌توان سرعت افزایش عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار در روز) را از مشتق اول تابع سیگموییدی برآورد کرد (شکل8 b). نقاط تلاقی مشتق سوم تابع سیگموییدی با محور x (شکل c8) زمان دقیق شروع و پایان دوره موثر پر شدن دانه (EGFP) را مشخص می‌سازد (Dionora and Kropff, 1995).

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ طول دوره پرشدن دانه گندم آبی برای شرایط شبیه‌سازی (مشهد، سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰) ۳۸ روز و طول دوره موثر پر شدن دانه ۱۳/۷ روز است. باید توجه داشت که میانگین سرعت افزایش عملکرد دانه در طی EGFP بسیار زیاد و برای داده‌های شکل ۱۰ در حدود ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار در روز است به بیان دیگر با وجودی‌که EGFP تنها ۳۴ درصد از کل دوره پرشدن دانه می‌باشد در حدود ۶۷ درصد از عملکرد در طی آن تجمع می‌یابد. در ادامه طول دوره موثر پر شدن دانه طی ۱۰ سال برای ۲ شهر منتخب از هر یک از ۳ ناحیه اقلیمی (مجموعاً ۶۰ مقدار) به روش فوق محاسبه شد. نتایج نشان داد طول این دوره برای گندم آبی در شرایط پتانسیل و در نواحی مختلف اقلیمی استان بین ۱۱ تا ۱۹ روز

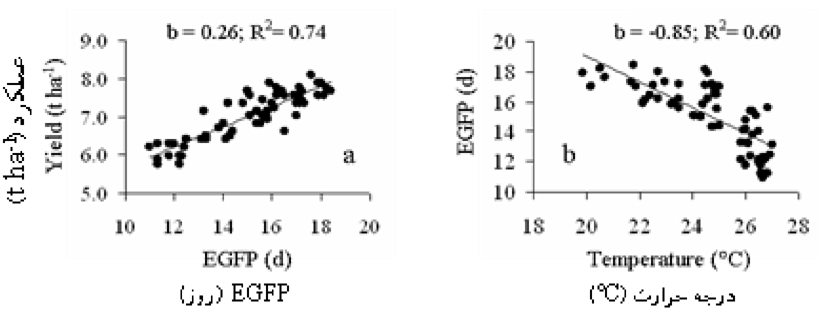
1- Effective grain filling period

است. رابطه بین مقادیر EGFP و عملکردهای شبیه‌سازی شده متناظر با آنها (شکل a9) حاکی از آن بود که ۷۴ درصد از تغییرات مشاهده شده در عملکرد پتانسیل گندم آبی استان طی دوره ۱۰ ساله مربوط به طول دوره موثر پر شدن دانه بوده و به ازای هر روز افزایش طول EGFP، این عملکرد در حدود ۲۶۰ کیلوگرم در هکتار افزایش می‌یابد.



شکل ۸- a) پیش‌بینی روند تجمع وزن خشک دانه گندم آبی در شرایط پتانسیل به‌وسیله مدل LINTUL (داده‌ها مربوط به شبیه‌سازی در شرایط آب و هوایی مشهد در سال زرعی ۹۱-۱۳۹۰ می‌باشد) و برازش تابع سیگموییدی برای توصیف روند. b) برآورد سرعت تجمع ماده خشک دانه گندم بر اساس مشتق اول تابع سیگموییدی. c) مشتق سوم تابع سیگموییدی برای تعیین زمان شروع و اتمام دوره موثر پرشدن دانه (EGFP)

Figure 8- a) Time trend of grain filling of wheat simulated by LINTUL model (data from simulation results under Mashhad conditions for 2011-2012 season) and fitted sigmoid function. b) Grain filling rate estimated from the first derivative of the sigmoid function. c) Third derivative of the sigmoid function showing start and end of effective grain filling period (EGFP)



شکل ۹- رابطه طول دوره موثر پر شدن دانه (EGFP) و عملکرد پتانسیل گندم آبی (a) و پاسخ EGFP به میانگین روزانه درجه حرارت در طی دوره پر شدن دانه (b). داده‌ها (n=۶۰) حاصل ۱۰ سال شبیه‌سازی عملکرد گندم در ۲ شهر منتخب از هر یک از ۳ ناحیه اقلیمی استان می‌باشد.

Figure 9- Relation between effective grain filling period (EGFP) and potential yield of irrigated wheat (a) and response of EGFP to mean daily temperature during grain filling period (b). Data points (n=60) are obtained from 10 years simulation of wheat yield in 2 selected stations from each of 3 climatic regions of the province

از سوی دیگر نتایج حاکی از وجود رابطه منفی و معنی‌داری (R^2=۰/۶۰) بین EGFP و میانگین درجه حرارت روزانه در طی دوره پر شدن دانه است (شکل b9) به‌طوری‌که به ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما در طی دوره پر شدن دانه ۰/۸۵ روز از طول EGFP کاسته شده که تقریباً معادل ۲۲۰ کیلوگرم دانه در هکتار می‌باشد. تاثیر افزایش درجه حرارت بر کاهش عملکرد گندم به‌دلیل کوتاه شدن طول مراحل نموی در بسیاری از مطالعات (برای مثال Fulco and Senthold, 2006; Xiao, *et al*., 2008) و نیز در ایران (Koocheki and Nassiri Mahallati, 2016) گزارش شده است. بنابراین به‌نظر می‌رسد که افزایش درجه حرارت ناشی از گرمایش جهانی در طی دهه گذشته عامل اصلی نوسان مشاهده شده (شکل ۷) در پتانسیل عملکرد گندم آبی در استان خراسان باشد.

عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد گندم دیم

تابع تولید مرزی بین عملکردهای ثبت شده گندم دیم از مزارع پر محصول و آزمایشات ایستگاهی در استان‌های خراسان رضوی و شمالی در پاسخ به میزان بارش سالانه در شکل a10 ارائه شده است. نقاط روی منحنی در هر سطحی از بارندگی نشان‌دهنده عملکرد قابل حصول یا به بیان دیگر عملکرد پتانسیل گندم دیم می‌باشند و اختلاف بین عملکردهای مشاهده شده با تابع مرزی خلاء عملکرد در هر مقدار بارش را مشخص می‌سازد. بر اساس این نتایج عرض از مبداء تابع مرزی در ۸۰ میلی‌متر بارندگی قرار دارد و با افزایش بارش عملکرد به‌صورت خطی افزایش یافته و در بارش‌های بالاتر از ۵۰۰ میلی‌متر تقریباً به ثبات می‌رسد (شکل a10). نتایج نشان می‌دهد که در بوم‌نظام‌های تولید گندم دیم استان‌های خراسان رضوی و شمالی میزان بارش سالانه در دامنه‌ای بین ۱۶۰ تا ۳۴۰ میلی‌متر قرار دارد که بیش از ۹۵ درصد آن در طی دوره رشد گندم نازل می‌شود. در این بوم‌نظام‌ها عملکرد نسبتاً پایین و در محدوده ۰/۵ تا ۱/۸ تن در هکتار است البته عملکردهای گزارش شده از آزمایشات ایستگاهی با مدیریت دقیق و مزارع پر محصول در همین دامنه بارندگی بین ۲ تا ۴ تن در هکتار می‌باشد که نشان‌دهنده پتانسیل بالا و درنتیجه خلاء قابل توجه عملکرد در این مناطق است به‌طوری‌که خلاء عملکرد گندم دیم در دو استان تحت بررسی بین ۱/۲ تا ۳/۱ تن در هکتار برآورد گردید (شکل b10). به‌علاوه با افزایش بارندگی خلاء عملکرد نیز افزایش می‌یابد به عبارت دیگر در مناطقی که عملکرد پتانسیل گندم دیم بیشتر است خلاء عملکرد بالاتر خواهد بود.

لازم به ذکر است نسبت عملکرد واقعی (Ya) به حداکثر عملکرد قابل حصول در شرایط دیم (Yw) با میزان بارندگی سالانه رابطه معنی‌داری نداشت (شکل c10) و در نتیجه با افزایش عملکرد پتانسیل گندم دیم مقدار Ya/Yw تقریباً ثابت بوده و در دامنه‌ای بین ۰/۲۴ تا ۰/۵۴ قرار دارد یعنی در استان‌های تحت بررسی عملکرد واقعی بین ۲۵ تا ۵۰ درصد حداکثر عملکرد قابل حصول می‌باشد.

با وجودی‌که مدل‌های شبیه‌سازی متعددی برای پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی در شرایط محدودیت آب وجود دارد ولی واسنجی و تعیین اعتبار این مدل‌ها مستلزم دسترسی به داده‌های دقیق آزمایشی است و بدون چنین داده‌هایی از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند (Grassini *et al*., 2015). تابع تولید مرزی از جمله روش‌های رایج در تخمین خلاء عملکرد محصولات زراعی است که در سال‌های اخیر جهت پیش‌بینی عملکرد پتانسیل و خلاء عملکرد به‌کار گرفته شده است (Kumbhakar and Tsionas, 2006; Neumann *et al*., 2010; Affholder *et al*., 2013) و جایگزین مناسبی برای مدل‌های شبیه‌سازی در شرایط محدودیت داده می‌باشد (van Ittersum *et al*., 2013).

با استفاده از تابع مرزی (شکل a10) عملکرد پتانسیل گندم دیم در ۳ ناحیه اقلیمی استان بین ۱۹۹۴ تا ۲۸۱۲ و میانگین ۱۰ ساله آن در کل استان ۲۴۳۱ کیلوگرم در هکتار برآورد شد (جدول ۴) در حالی‌که میانگین ۱۰ ساله عملکرد واقعی استان ۴۴۱ کیلوگرم در هکتار بوده و بالاترین مقدار آن در ناحیه ۱ از ۵۶۲ کیلوگرم در هکتار تجاوز نکرد به‌علاوه ضریب تغییرات عملکرد واقعی گندم دیم استان بین ۲۹-۲۷ درصد و به‌مراتب بیشتر از گندم آبی (جدول ۳) می‌باشد.

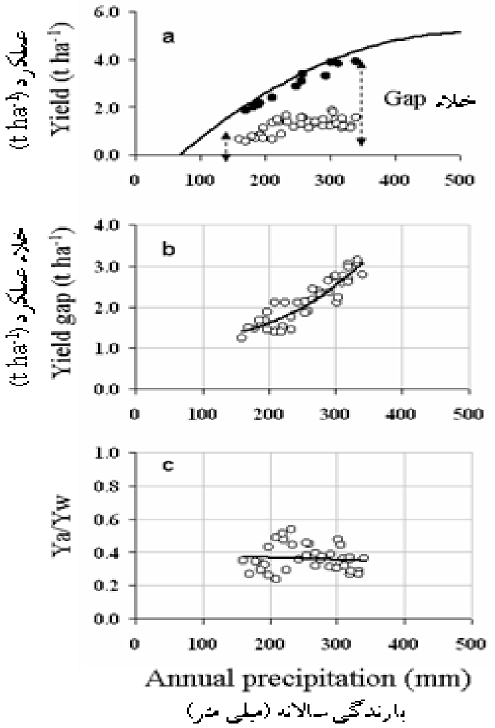
پایین بودن عملکردهای واقعی باعث ایجاد خلاء بسیار زیاد معادل ۱۶۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلوگرم در هکتار شده است که در حدود ۸۰ تا ۸۴ درصد عملکرد پتانسیل می‌باشد بنابراین عملکرد واقعی گندم دیم استان تنها ۲۰ درصد پتانسیل آن است (جدول ۴). به‌نظر می‌رسد پایین بودن کارآیی مصرف آب در دیم‌زارهای استان نقش مهمی در شکل‌گیری این وضعیت دارد. برآورد کارآیی مصرف آب (WUE) بر مبنای تابع تولید مرزی (شکل ۱۱) نشان داد که WUE در شرایط پتانسیل برای تولید گندم دیم با افزایش بارندگی افزایش یافته و در بارش‌های بین ۲۲۰ تا ۳۲۰ میلی‌متر به بالاترین مقدار (۱/۳۵ کیلوگرم دانه به ازای متر مکعب آب) می‌رسد و نهایتاً در بارندگی‌های بالاتر از ۳۶۰ میلی‌متر به‌تدریج کاهش می‌یابد.

با وجودی‌که مقادیر واقعی WUE به مراتب کمتر از مقدار قابل حصول بود ولی از میزان بارندگی تبعیت کرده و با افزایش بارش از ۰/۳به ۰/۷ کیلوگرم دانه به ازای مترمکعب آب رسید (شکل ۱۱).

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که خلاء عملکرد گندم دیم در استان‌های تحت بررسی به‌طور معنی‌داری تابع کارآیی مصرف آب است (شکل ۱۲) و ۶۹ درصد از تغییرات مشاهده شده در خلاء عملکرد به‌وسیله WUE توصیف می‌شود.

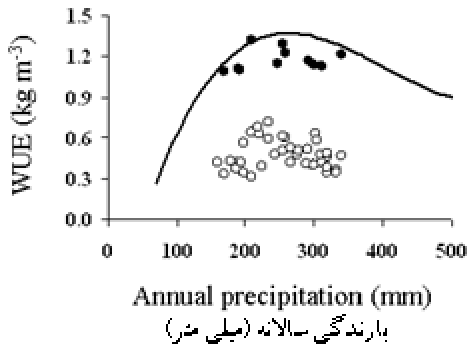
مطالعات انجام شده در مورد برآورد عملکرد پتانسیل گندم در شرایط دیم بسیار محدود است برای مثال طائی سمیرمی و همکاران

(Taei Semiromi *et al.*, 2012) پتانسیل عملکرد گندم دیم در حوضه آبریز بروجن با بارندگی سالانه حدود ۳۰۰ میلی‌متر را ۳/۷-۲/۴ تن در هکتار و خلاء عملکرد آن را ۳/۶-۳/۰ تن در هکتار برآورد کردند.



شکل ۱۰- a) تابع مرزی تولید جهت توصیف رابطه عملکرد گندم دیم و میزان بارندگی سالانه در استان خراسان رضوی و شمالی، دایره‌های سیاه مقادیر عملکرد در آزمایشات ایستگاهی و مزارع پر محصول می‌باشند که تابع مرزی به آنها برازش شده است و دایره‌های سفید عملکردهای واقعی را مشخص می‌سازند. b) رابطه بین خلاء عملکرد گندم دیم و میزان بارندگی سالانه و c) رابطه نسبت عملکرد واقعی (Y_a) به عملکرد قابل حصول (Y_W) با میزان بارندگی سالانه در استان‌های خراسان رضوی و شمالی

Figure 10- a) Frontier production function for relation between rainfed wheat yield and annual precipitation in Khorasan Razavi and Shomali provinces. The function is fitted to yields recorded in controlled experiments and high yielding farms (closed circle a), actual yields are shown with open circles. b) Relation between yield gap of rainfed wheat and annual precipitation and. c) relation between ratio of actual yield to attainable yield (Y_a/Y_W) and annual precipitation in Khorasan Razavi and Shomali provinces



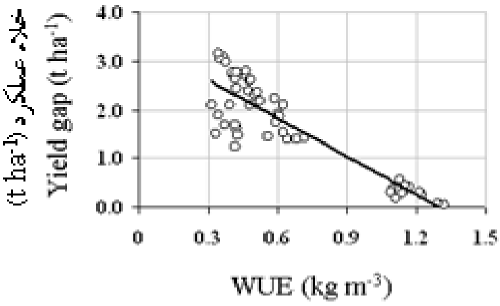
شکل ۱۱- رابطه کارآیی مصرف آب (WUE) و میزان بارندگی سالانه در بوم‌نظام‌های تولید گندم دیم استان خراسان رضوی و شمالی. که بر اساس تابع تولید مرزی (شکل ٤-الف) برآورد شده است، دایره‌های سیاه مقادیر WUE مربوط به آزمایشات ایستگاهی و مزارع پرمحصول و دایره‌های سفید مقادیر مشاهده شده WUE می‌باشند.

Figure 11- Relation between water use efficiency (WUE) and annual precipitation for rainfed wheat production systems of Khorasan Razavi and Shomali provinces obtained from frontier production function, closed circles show WUE of controlled experiments and high yielding fields and open circles are actual WUE

جدول ٤- میانگین عملکرد واقعی و ضریب تغییرات (CV) آن و مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد پتانسیل، خلاء عملکرد و خلاء نسبی عملکرد گندم دیم طی دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸٤) در ۳ ناحیه اقلیمی کشاورزی استان خراسان رضوی و تغییر مقیاس نتایج به کل استان

Table 4- Mean actual yield and its coefficient of variation (CV) and predicted values of potential yield, yield gap and relative yield gap for rainfed wheat over a 10-year period (1384-1393) in 3 agroclimatic regions of Khorasan Razavi province and up-scaled results to the whole province

		Region 1 ناحیه ۱	Region 2 ناحیه ۲	Region 3 ناحیه ۳	Province استان
		Rainfed wheat گندم دیم			
Actual yield (Y_A kg ha^{-1})	عملکرد واقعی	562	343	407	441
CV (%)	ضریب تغییرات (٪)	29.3	26.7	27.0	27.7
Potential yield (Y_P kg ha^{-1})	عملکرد پتانسیل	2812	1994	2537	2431
Yield gap (Y_G kg ha^{-1})	خلاء عملکرد	2250	1651	2130	1990
Relative gap	خلاء نسبی	0.80	0.83	0.84	0.81
Yield gap$_{85\%}$ ($Y_{G85\%}$ kg ha^{-1})	خلاء عملکرد (٪۸۵)	1828	1352	1749	1625
Relative gap (85%)	خلاء نسبی (٪۸۵)	0.76	0.80	0.81	0.79



شکل ۱۲- رابطه خلاء عملکرد گندم دیم و کارآیی مصرف آب (WUE) در بوم‌نظام‌های تولید گندم دیم در استان خراسان رضوی و شمالی (r^2=0.69)

Figure 12- Relation between yield gap of rainfed wheat yield and water use efficiency (WUE) in production systems of Razavi and Shomali provinces

هاچمن و همکاران (Hochman *et al.*, 2013) با ارزیابی زمانی و مکانی تولید گندم دیم در استرالیا عملکرد پتانسیل گندم دیم در این کشور را ۱/۱۴ ±۳/۵۰ و خلاء عملکرد را معادل ۰/۷۷ ±۱/۵۲ تن در هکتار برآورد کردند. در ادامه هاچمن و همکاران (Hochman *et al.*, 2016) با استفاده از حجم زیادی از داده‌ها شامل میانگین شبیه‌سازی شده عملکرد پتانسیل در ۲۴۵ منطقه و در طی یک دوره ۱۵ ساله عملکرد پتانسیل گندم دیم در استرالیا را ۳/۵ و خلاء عملکرد را ۱/۹تن در هکتار و نسبت عملکرد واقعی به پتانسیل را ۰/۴۹ برآورد کردند که نشان‌دهنده خلائی معادل ۵۱ درصد از عملکرد پتانسیل می‌باشد. به‌علاوه نتایج این تحقیق نشان داد که خلاء عملکرد در مناطقی که پتانسیل بیشتری داشتند بالاتر بود. البته کارآیی مصرف آب در دیم‌زارهای این کشور با میانگین بارندگی ۲۳۴ میلی‌متر در سال ۰/۷۹ ±۱/۵۱ کیلوگرم دانه به ازای متر مکعب آب است (Hochman *et al.*, 2013) در حالی‌که در دیم‌زارهای خراسان رضوی و شمالی با بارندگی سالانه ۵۲ ±۲۵۸ میلی‌متر میانگین کارآیی مصرف آب ۰/۱۲ ±۰/۵۸ کیلوگرم دانه به ازای متر مکعب آب به‌دست آمد. لازم به ذکر است که این کارآیی بر اساس میزان بارندگی سالانه برآورد شده و در واقع کارآیی مصرف بارندگی[1] می‌باشد. بنی و هنسلی (Bennie and Hensley, 2001) نشان دادند که در حدود ۷۰-۶۵ درصد از کل بارش در طی فصل رشد برای گیاهان زراعی قابل استفاده است. بر این اساس کارآیی مصرف آب در بوم‌نظام‌های دیم استان ۳۵-۳۰ درصد بیشتر و در حدود ۰/۷۸ کیلوگرم دانه به ازای مترمکعب آب است در حالی‌که مقدار بهینه آن در استان حدود ۱/۸۲ کیلوگرم دانه بر متر مکعب می‌باشد (شکل ۱۱). سادراس و آنگوس Sadras and Angus (2006) با برازش تابع مرزی تولید آب در دامنه وسیعی از میزان آب قابل دسترس (بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر) نشان دادند که کارآیی بالقوه مصرف آب در گندم دیم معادل ۲/۲ کیلوگرم دانه به ازای متر مکعب آب می‌باشد.

1- Precipitation use efficiency

روند تغییرات زمانی پتانسیل عملکرد گندم دیم یا بـه بیـان دیگـر حداکثر عملکرد در شـرایط محـدودیت آب (Y_W) در هـر سـه ناحیـه اقلیمی کشاورزی استان خراسان رضـوی در حـال کـاهش مـی‌باشـد. بیشترین شیب کـاهش مربـوط بـه ناحیـه ۳ (R3) بـه میـزان۵۹/۱- کیلـوگرم در هکتـار در سـال (شـکل c13) و کمتـرین آن (۱۹/۸- کیلوگرم در هکتار در سال) مربـوط بـه ناحیـه ۲ (R2) اسـت (شـکل b13). این روند منفی در پتانسیل عملکرد گندم دیم اسـتان بـه دلیـل کاهش نزولات در طی دوره ۱۰ سـاله تحـت بررسـی مـی‌باشـد کـه عملکرد واقعی گندم دیم را نیز با شیب مشابهی کـاهش داده اسـت و در نتیجه خلاء نسبی عملکرد (Y_G/Y_W) در فاصله سـال‌هـای۱۳۹۳- ۱۳۸۴در هر سه ناحیه تقریباً ثابت و در دامنـه‌ای بـین ۰/۸۴-۰/۷۶ در نوسان بوده است.

منفی بودن شیب تغییرات عملکرد پتانسیل گندم دیـم در نـواحی اقلیمی استان در واقع نشان می‌دهد که ارقام زراعی فعلـی در شـرایط جدید اقلیمی قادر به تولید عملکرد بالا نمی‌باشند کـه در ایـن‌صـورت خلاء عملکرد بایـد بـا تأکیـد بـر روش‌هـای اصـلاح نبـات پـر شـود (Denison, 2015; Dingkuhn *et al.*, 2015). باید توجه داشت که یافته‌های این تحقیق در مقیاس منطقه بوده و ممکن اسـت در سـایر استان‌ها و یا در کل کشور وضعیت دیگری حـاکم باشـد. بـرای مثـال سـلطانی و همکـاران (Soltani *et al.*, 2016) بـا ارزیـابی عملکـرد پتانسیل و خلاء آن در مـورد نخـود دیـم کشـور نشـان دادنـد کـه در مقیاس ملی سهم روش‌های اصلاحی در پر کردن این خلاء تنهـا ۲۵ درصد می‌باشد.

با توجه به پایین بودن کارآیی مصرف آب در دیم‌زارهـای اسـتان (شکل ۱۱) و نقش تعیین‌کننده این کارآیی در خلاء عملکرد گندم دیم (شکل ۱۲) بالا بردن کارآیی مصرف آب موثرترین راه حـل بـرای پـر کردن خلاء عملکرد گنـدم در بـوم‌نظـام‌هـای دیـم اسـتان محسـوب می‌شود. افزایش کارآیی مصرف آب هم از طریق اصلاح ارقام جدید و هم با روش‌های مدیریت زراعی امکان‌پذیر می‌باشد و تلفیـق ایـن دو راهکار مناسبی برای افزایش پتانسیل عملکـرد گنـدم دیـم و کـاهش خلاء آن خواهد بود.

نتیجه‌گیری

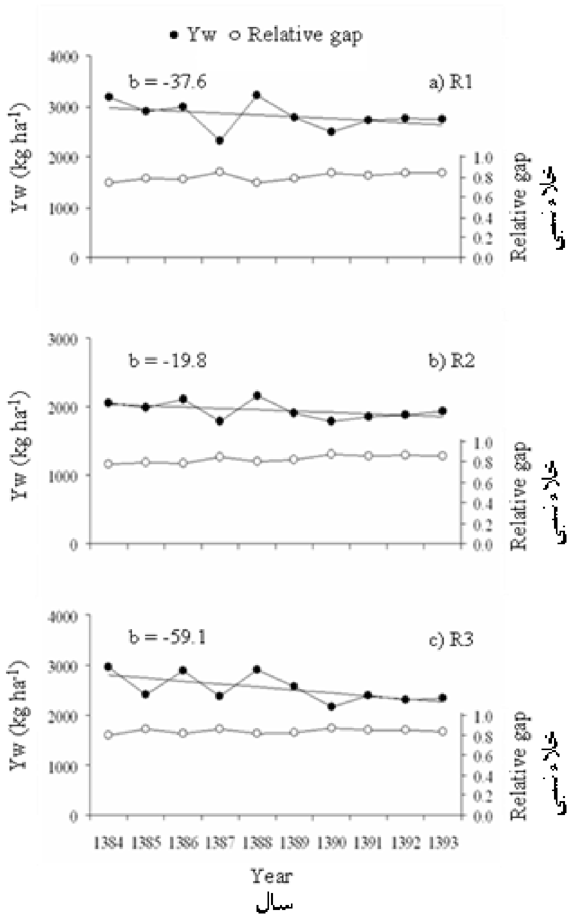
در این تحقیق عملکرد پتانسیل چغندرقنـد، گنـدم آبـی و دیـم در نواحی اقلیمی استان خراسان رضوی و در طـی دوره‌ای ۱۰ سـاله بـر پایه چارچوب ارائه شده توسط اطلس جهانی خـلاء عملکـرد بـرآورد و سپس خلاء عملکرد این محصولات محاسبه شد. نتایج نشان داد کـه استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی ساده‌ای نظیـر LINTUL در صـورت واسنجی و تعیین اعتبـار آنهـا در مقیـاس وسـیع قابلیـت مطلـوبی در پیش‌بینی عملکرد پتانسیل دارند به‌علاوه در شرایط عدم دسترسی بـه داده‌های دقیق برای واسنجی و تعیین اعتبار مـدل‌هـای رشـد (نظیـر شرایط محدودیت آب) تابع تولید مرزی برآورد قابل قبولی از عملکـرد پتانسیل به‌دست خواهد داد.

بالاترین میانگین عملکرد پتانسیل چغندرقند و گندم آبـی مربـوط به نواحی اقلیمی معتدل خشک و معتدل نیمه‌خشک بـوده و عملکـرد پتانسیل این محصولات در ناحیه گرم و خشـک اسـتان در حـدود ۱۵ درصد کمتر از دو ناحیه دیگر است در حالی‌کـه در میـانگین عملکـرد پتانسیل گندم دیم در ناحیه معتدل نیمه‌خشک بالاترین مقـدار را دارد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که خلاء قابل مهار عملکرد چغندرقند و گندم آبی در کل استان در حدود ۵۲ درصد از عملکرد پتانسیل است به بیـان دیگـر ۴۸ درصـد از پتانسـیل اقلیمـی اسـتان در تولیـد ایـن محصولات در عمل تحقق می‌یابد. این خلاء در مورد گندم دیم بسیار زیاد بوده و عملکرد واقعی تنها ۲۵ درصد از عملکـرد پتانسـیل اسـت. رونـد تغییـرات ۱۰ سـاله حـاکی از آن اسـت کـه خـلاء عملکـرد در چغندرقند و با سرعت کمتری در گندم آبی در حال پر شـدن اسـت در حالی‌که در مورد خلاء عملکرد گندم دیم روندی افزایشی مشاهده شد.

با توجه بـه نتـایج ایـن مطالعـه جهـت پرکـردن خـلاء عملکـرد چغندرقند و گندم آبی در استان خراسان رضوی اولویـت بـا بـه‌سـازی روش‌های مـدیریتی بـوده و اصـلاح ارقـام جدیـد در اولویـت بعـدی می‌باشد. در حالی‌که در مورد گندم دیم به دلیل کاهشی بودن روند ۱۰ ساله عملکرد پتانسیل، لازم است که اصلاح ارقـام جدیـد بـه‌ویـژه در جهت ارتقاء کارآیی مصرف آب در کنار روش‌های مدیریتی بـه‌عنـوان راهکارهای پرکردن خلاء عملکرد مورد توجه قرار گیرد.

سپاسگزاری

بودجه این تحقیق از محل اعتبارات طرح پژوهـه شـماره ۳۵۴۶۰ مورخ ۸۷/۷/۳۰ توسط معاونـت پژوهشـی دانشـگاه فردوسـی مشـهد تأمین شده که بدین‌وسیله سپاسگزاری می‌شود.



شکل ۱۳- روند تغییرات عملکرد پتانسیل عملکرد گندم دیم (Y_W) و خلاء نسبی عملکرد (Y_G/Y_W) در سه ناحیه اقلیمی کشاورزی (R1, R2, R3) استان خراسان رضوی طی دوره ۱۰ساله ۱۳۹۳-۱۳۸۴. در شکل شیب تغییرات عملکرد قابل حصول (b, kg ha^{-1} y^{-1}) نیز نشان داده شده است.

Figure 13- Time trend of potential yield of rainfed wheat (Y_W) and relative yield gap (Y_G/Y_W) in 3 agroclimatic regions (R1, R2, R3) of Khorasan e Razavi province during 1384-1393 period. Slope of the trend line (b, kg ha^{-1} y^{-1}) is also shown

References

1. Abeledo, L. G., Savin, R., and Slafer, G. A. 2008. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. European Journal of Agronomy 28: 541-550.
2. Acreche, M. M., Briceño-Felix, G., Sanchez, J. A. M., and Slafer, G. A. 2008. Physiological bases of genetic gains in Mediterranean bread wheat yield in Spain. European Journal of Agronomy 28: 162-170.
3. Affholder, F., Poeydebat, C., Corbeels, M., Scopel, and E., Tittonell, P. 2013. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modeling. Field Crops Research 143: 106-118.
4. Alexandratos, N., and Bruinsma, J. 2012. World agriculture towards 2030/2050. The 2012 Revision. ESA Working paper No. 12-03, April 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome.
5. Batchelor, W. D., Basso, B., and Paz, J. O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. European Journal of Agronomy 18: 141-158.
6. Bennie, A. T. P., and Hensley, M. 2001. Maximizing precipitation utilization in dryland agriculture in South Africa - a review. Journal of Hydrology 241: 124-139.
7. Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., and Huard, F. 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119: 201-212.
8. Bruinsma, J. 2009. The resource outlook to 2050. By how much do land; water use and crop yields need to increase by 2050? In: Proc. FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050, 24–26 June 2009. FAO, Rome (available at http://www.fao.org/wsfs/forum2050/ background-documents/expert-papers/en/).

9. Casanova, D., Goudriaan, J., Bouma, J. and Epema, G. F. 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. Geoderma 91: 191-216.
10. Cassman, K. G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proceedings of National Academy of Sciences of the U.S.A. 96: 5952-5959.
11. Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T., and Yang, H. S. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. Annual Review of Environmental Resources 28: 315-358.
12. Cassman, K. G., Grassini, P., and van Wart, J. 2010. Crop yield potential, yield trends, and global food security in a changing climate. In: Rosenzweig, C., Hillel, D. (Eds.), Handbook of Climate Change and Agroecosystems. Imperial College Press, London, pp. 37-51.
13. De Wit, A. J. W., Boogaard, H. L., and van Diepen, C. A. 2005. Spatial resolution of precipitation and radiation: the effect on regional crop yield forecasts. Agricultural and Forest Meteorology 135: 156-168.
14. Deihimfard, R., Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2015a. Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modeling. Field Crops Research 184: 28-38.
15. Deihimfard, R., Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2015b. Simulating the potential yield and yield gaps of sugar beet due to water and nitrogen limitations in Khorasan province using SUCROS model. Journal of Agroecology 7 (3): 315-330. (in Persian with English abstract).
16. Denison, R. F. 2015. Evolutionary tradeoffs as opportunities to improve yield potential. Field Crops Research 182: 3-8.
17. Dingkuhn, M., Laza, M. R. C., Kumar, U., Mendez, K. S., Collard, B., Jagadish, K., Singh, R. K., Padolina, T., Malabayabas, M., Torres, E., Rebolledo, M. C., Manneh, B., and Sow, A. 2015. Improving yield potential of tropical rice: achieved levels and perspectives through improved ideotypes. Field Crops Research 182: 43-59.
18. Dionora, M. J. A. and Kropff, M. J. 1995. Variation in rate and duration of grain filling in rice genotypes. In: Aggarwal, P. K., et al. (eds.). Application of Systems Approaches in Plant Breeding. SARP Research Proceedings, International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. pp: 123-127.
19. Efron, B. 1983. Estimating the error rate of a prediction rule: Some improvements on cross validation. Journal of the American Statistical Association 78: 316-331.
20. Efron, B., and Tibshirani, R. J. 1998. An Introduction to the Bootstrap. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
21. Elliott, J. A., and De Jong, E. 1993. Prediction of field denitrification rates: a boundary-line approach. Soil Science Society of America Journal 57: 82-87.
22. Espe, M. B., Cassman, K. G., Yang, H., Guilpart, N., Grassini, P., Van Wart, J., Anders, M., Beighley, D., Harrell, D., Linscombe, S., McKenzie, K., Mutters, R., Wilson, L. T., and Linquist, B. A. 2016. Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. Field Crops Research 196: 276-283.
23. Ewert, F., Rounsevell, M. D. A., Reginster, I., Metzger, M. J., and Leemans, R. 2005. Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. Agriculture, Ecosystem and Environment 107: 101-116.
24. FAOSTAT. 2013. Crop production Statistics. Food and Agriculture Organization: Rome. At www.faostat. fao.org.
25. FAOSTAT. 2015. Crop production Statistics. Food and Agriculture Organization: Rome. At www.faostat. fao.org.
26. Fischer, G. 2009. World food and agriculture to 2030/50: how do climate change and bioenergy alter the long-term outlook for food, agriculture and resource availability? In: Proc. FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050, (available at http://www.fao.org/wsfs/forum2050/backgrounddocuments/ expert-papers/en/).
27. Fischer, R. A. 2015. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. Field Crops Research 182: 9-18.
28. Fischer, R. A., and Edmeades, G. O. 2010. Breeding and cereal yield progress. Crop Science 50: S86-S98.
29. Fulco, L., and Senthold, A. 2006. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. Agricultural Systems: 90: 159-179.
30. Gharineh, M. H., Bakhshandeh, A., Andarzian, B., and Faieai zadeh, N. 2012. Agroecological zoning of Khozestan province for potential yield of irrigated wheat using WOFOST model. Journal of Agroecology 4 (3): 255-264. (in Persian with English abstract).
31. Grassini, P., Thornburn, J., Burr, C., and Cassman, K. G. 2011. High-yield irrigated maize in the Western US Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. Field Crops Research 120: 144-152.
32. Grassini, P., van Bussel, L. G., van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., van Ittersum, M. K., and Cassman, K. G. 2015. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. Field Crops Research 177: 49-63.
33. Hall, A. J., Feoli, C., Ingaramo, J., and Balzarini, M. 2013. Gaps between farmer and attainable yields across rainfed sunflower growing regions of Argentina. Field Crops Research 143: 119-129.
34. Hall, A. J., and Richards, R. A. 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. Field Crops Research 143: 18-33.

35. Hochman, Z., Gobbett, D., Holzworth, D., McClelland, T., van Reese, H., Marinoni, O., Garcia, J. N., and Horan, H. 2013. Reprint of "Quantifying yield gaps in rainfed cropping systems: A case study of wheat in Australia". Field Crops Research 143: 65-75.
36. Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., and Garcia,J. N. 2016. Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. Field Crops Research 197: 97-106.
37. Hoffmann, C. M., and Kluge-Severin, S. 2010. Light absorption and radiation use efficiency of autumn and spring sown sugar beets. Field Crops Research 119: 238-244.
38. Irmak, A., J. W. Jones, T. Mavromatis, S. M. Welch, K. J. Boote, and G. G. Wilkerson. 2000. Evaluating methods for simulating cultivar responses using cross validation. Agronomy Journal 92 (6): 1140-1149.
39. Jaggard, K. W., Qi, A., Eric, S., and Ober, E. S. 2010. Possible changes to arable crop yields by 2050. Philosophical Transaction of Royal Society of Biology 365: 2835-2851.
40. Jaggard, K. W., and Werker, A. R. 1999. An evaluation of the potential benefits and costs of autumn-sown sugarbeet in Europe. Journal of Agricultural Science (Cambridge) 132: 91-102.
41. Jones, P. N., and P. S. Carberry. 1994. A technique to develop and validate simulation models. Agricultural Systems 46: 427-442.
42. Kenter, C., Hoffmann, C. M., and Märländer, B. 2006. Effects of weather variables on sugar beet yield development. European Journal of Agronomy 24: 62-69.
43. Kiniry, J. R., Bean, B., Xie, Y., and Chen, P. 2004. Maize yield potential: critical processes and simulation modeling in a high-yielding environment. Agricultural Systems 82: 45-56.
44. Kluge-Severin, S., Hoffmann, C., and Märländer, B. 2009. Yield and quality of winter beets - prospects for sugarbeet production? Zuckerindustrie 134: 366-376.
45. Koning, N., and van Ittersum, M. K. 2009. Will the world have enough to eat? Current Opinions on Environmental Sustainability 1: 77-82.
46. Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2019. Contribution of genetic and agronomic measures on yield gain of irrigated wheat in Iran for 1971-2011. Journal of Agroecology (in press). (in Persian with English abstract).
47. Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2007. Impacts of climate change and CO_2 concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. Iranian Journal of Field Crops Research 6 (1): 139-153. (in Persian with English abstract).
48. Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2016. Effects of climate change on agricultural production of Iran: II. Perdicting productivity of field crops and adaptation strategies. Iranian Journal of Field Crops Research 14(2): 1-20. (in Persian with English abstract).
49. Kumbhakar, C. S., and Tsionas, E. G. 2006. Estimation of stochastic frontier production functions with input-oriented technical efficiency. Journal of Econometrics 133: 71-96.
50. Laborte, A. G., de Bie, C. A. J. M., Smaling, E. M. A., Moya, P. F., Boling, A. A., and van Ittersum, M. K. 2012. Rice yields and yield gaps in Southeast Asia: past trends and future outlook. European Journal of Agronomy 36: 9-20.
51. Lobell, D. B., Cassman, K. G., and Field, C. B. 2009. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. Annual Review of Environmental Resources 34: 179-204.
52. Mackay, I., Horwell, A., Garner, J., White, J., McKee, J., and Philpott, H. 2011. Reanalyses of the historical series of UK variety trials to quantify the contributions of genetic and environmental factors to trends and variability in yield over time. Theoretical and Applied Genetics 122: 225-238.
53. Merlosa, F. A., Monzon, J. P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andradea, F. H., Halle, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K. G., and Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. Field Crops Research 184: 145-154.
54. Metzger, M. J., Bunce, R. G. H., Jongman, R. H. G., Sayre, R., Trabucco, A., and Zomer, R. 2013. A high-resolution bioclimate map of the world: a unifying framework for global biodiversity research and monitoring. Global Ecology and Biogeography 22: 630-638.
55. MJA, 2015. Agricultural Statistics Yearbook, 2014-15. vol. 1. Crops. Ministry of Jehad e Keshavrzi, 2015.
56. Mondani, F. 2012. Simulating the effect of climate change on wild oat and sunn pest damage on wheat under Mashhad weather conditions. PhD thesis, Ferdowsi University of Mashhad. (in Persian with English abstract).
57. Muchow, R. C., and Kropff, M. J. 1997. Assessing the potential yield of tropical crops: role of field experimentation and simulation. In: Kropff, M.J., Teng, P.S., Aggarwal, P.K., Bouma, J., Bouman, B.A.M., Jones, J.W., Van Laar, H.H. (Eds.), Applications of Systems Approaches at the Field Level. Vol. 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 101-112.
58. Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2014. Long term evaluation of yield stability trend for cereal crops in Iran. Journal of Agroecology 6 (3): 607-621. (in Persian with English abstract).
59. Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2019. Yield monitoring for wheat and sugar beet in Khorasan province: 1-Analysis of methods for estimating potential yield. Journal of Agroecology 16 (4): 723-741. (in Persian with English abstract).

60. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., and Jahan, M. 2011. Radiation absorption and use efficiency in relay intercropping and double cropping of winter wheat and maize. Iranian Journal of Field Crops Research 8 (6): 878-890. (in Persian with English abstract).
61. Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2009. Agroecological zoning of wheat in Khorasan provinces: Estimating yield potential and yield gap. Iranian Journal of Field Crops Research 7 (2): 695-709. (in Persian with English abstract).
62. Neumann, K., Verberg, P. H., Stehfest, E., and Muller, C. 2010. The yield gap of global grain production: a spatial analysis. Agricultural Systems 103: 316-326.
63. O'Connell, M. G., O'Leary, G. J., Whitfield, D. M., and Connor, D. J. 2004. Interception of photosynthetically active radiation and radiation use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. Field Crops Research 85: 111-124.
64. Oerke, E. C., Dehne, H. W., Schonbeck, F., and Weber, A. 1994. Crop Production and Crop Protection. Estimated Losses in Major Food and Cash Crops. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
65. Ortiz, R., Sayre, K. D., Govaerts, B., Gupta, R., Subbarao, G. V., Ban, T., Hodson, D., Dixon, J. M., Ortiz-Monasterio, J. I., and Reynolds, M. 2008. Climate change: Can wheat beat the heat? Agriculture Ecosystems and Environment 126: 46-58.
66. Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Angulo, C., Helvinka, P., Moriondo, M., and Olesen, J. E. 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop models. European Journal of Agronomy 35: 103-114.
67. Parsa, S. 2008. Modeling spatial and temporal variation of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield in Khorasan province. PhD thesis. Ferdowsi University of Mashhad. (in Persian with English abstract).
68. Reynolds, M., Bonnett, D., Chapman, S. C., Furbank, R. T., Manes, U., Mather, D. E., and Parry, M. A. J. 2011. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies. Journal of Experimental Botany 62: 439-452.
69. Richter, G. M., Jaggard, K. W., and Mitchell, R. A. C. 2001. Modeling radiation interception and radiation use efficiency for sugar beet under variable climatic stress. Agricultural and Forest Meteorology 109: 13-25.
70. Sadras, V. O., and Angus, J. F. 2006. Benchmarking water use efficiency of rainfed wheat crops in dry mega-environments. Australian Journal of Agricultural Research 57: 847-856.
71. Schnug, E., Heym, J., and Achwan, F. 1996. Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the Boundary Line Development System (Bolides). Communications in Soil Science and Plant Analysis 27: 2739-2748.
72. Seyed Jalali, S. A., Sarmadian, F., and Shorafa, M. 2012. Modeling potential land productivity for winter wheat in Aghili region, Khozestan province. Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences) 27 (4): 427-439.
73. Shatar, T. M., and McBratney, A. B. 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. Journal of Agricultural Science 142: 553-560.
74. Soltani, A., Hajjarpour, A., and Vadez, V. 2016. Analysis of chickpea yield gap and water-limited potential yield in Iran. Field Crops Research 185: 21-30.
75. Taei Semiromi, J. Ghanbari, A., Amiri, F., Ghaffari, A., Siahsar, B., and Ayoubi, Sh. 2012. Agroecological zoning of wheat in the Borujen watershed: Rianfed and irrigated wheat cropping system evaluation. Journal of Agricultural Sciences and Sustainable Production 22 (4): 1-12. (in Persian with English abstract).
76. Thorp, K. R., Batchelor, W. D., Paz, J. O., Kaleita, A. L., and DeJonge, K. C. 2007. Using cross validation to evaluate CERES-Maize yield simulation within a decision support system for precision agriculture. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers 50 (4): 1467-1479.
77. van Bussel, L. G., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., Saito, K., Cassman, K. G., and van Ittersum, M. K. 2015. From field to atlas: upscaling of location-specific yield gap estimates. Field Crops Research 177: 98-108.
78. van Delden, A. 2001 Yielding ability and weed suppression of potato and wheat under organic nitrogen management. PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands, ISBN 90 5808 519_/8, pp. 197.
79. van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., and Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. Field Crops Research 143: 4-17.
80. van Laar, H. H., Goudriaan, J., and, Van Keulen, H. 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen, The Netherlands, pp. 52.
81. van Wart, J., van Bussel, L. G., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N. D., and Claessens, L. 2013. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. Field Crops Research 143: 44-55.
82. Viglizzo, E. F., Pordomingo, A. J., Castro, M. G., Le´rtora, F. A., and Bernardos, J. N. 2004. Scale-dependent controls on ecological functions in agroecosystems of Argentina. Agriculture, Ecosystems and Environment 101: 39-51.

83. Werker, A. R., and Jaggard, K. W. 1998. Dependence of sugar beet yield on light interception and evapotranspiration. Agricultural and Forest Meteorology 89: 229- 240.
84. Xiao, G., Zhang, Q., Yao, Y., Zhao, G., Wanga, R., Bai, H., and Zhang, F. 2008. Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid northwestern China. Agriculture, Ecosystems and Environment 127: 37-42.
85. Xiong, W., Holman, I., Conway, D., Lin, E., and Li, Y. 2008. A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies. Ecological Modeling 213: 365-380.
86. Zhang, X., Wang, S., Sun, H., Chen, S., Shao, L., and Liu, X. 2013. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain. European Journal of Agronomy 50: 52-59.
87. Zhou, Y., He, Z. H., Sui, X. X., Xia, X. C., Zhang, K., and Zhang, G. S. 2007. Genetic improve-ment of grain yield and associated traits in the Northern China winter wheat region from 1960 to 2000. Crop Science 47: 245-253.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 17, No. 1, Spring. 2019, p. 15-38

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، ص. ۳۸-۱۵

Yield Monitoring for Wheat and Sugar beet in Khorasan Province: 2- Estimation of Yield Gap

A. Koocheki[1*], M. Nassiri Mahallati[1]
Received: 12-02-2017
Accepted: 17-10-2017

Introduction: To realize global food demand by 2050 world cereal production should be increased up to 49% compared to 2006. This level of production could be achieved by annual yield increment of 1.16%. However, the current rates are much lower. At the same time, there is a very restricted area to increase cultivated lands because of resource limitation, provided that increase in crop yields is the main option to sustain food security. Potential yield (YP) could be achieved when limiting and reducing factors are completely absent during crop growth. YP is an indicator for the yielding capacity of a given environment and management system and estimating the difference between YP and actual yield, known as yield gap, is crucial for improvement of crop production systems at regional or national scale. In this study yield gap and its temporal trend for sugar beet, irrigated and rainfed wheat are estimated over Khorasan Razavi province based on the method developed by Global Yield Gap Atlas.

Materials and Methods: Following the protocol provided by Global Yield Gap Atlas, Khorasan province was clustered into agroclimatic zones using the proposed indices (cumulative degree days above 0 ºC, aridity index and temperature seasonality) based on 10 years (1384-1393) weather data. YP of sugar beet and irrigated wheat for the study period in the climatic regions was first estimated for selected cities within each region using LINTUL model and finally the simulation results were up scaled from cities to region and from regions to the whole province. The model was cross-validated against measured data using leave-one-out (LOO) method to increase accuracy of predictions. Potential yield of rainfed wheat (YW) was estimated from frontier production function which was fitted to yield data over a wide range of annual precipitation. Yield gap (YG) of the studied crops was estimated as the difference between potential (YP) and actual yields (YA) for each region and over the 10-year period. In addition exploitable gap (YG85%=85%YP-YA) was also calculated.

Results and Discussion: The accuracy of LINTUL model for simulation of sugar beet and irrigated wheat yields was considerably increased after cross validation and the prediction error was reduced by 6.5 - 7.8%. Mean YP of irrigated wheat in the climatic region 1 (temperate, semi-dry), 2 (hot, dry) and 3 (temperate, dry) was respectively, 7248, 6478 and 7852 and for the whole province 6936 kg ha-1. Time trend of YP for irrigated wheat was not significant in 3 climatic regions however, high annual variation of YP was found over the studied period. Results indicated that up to 74% of this variation was accounted for by changes in the effective grain filling period in response to temperature. YG85% of irrigated wheat in all climatic regions was increased up to 4 t ha^{-1} during 1384-1388 but decreased later on so that relative gap was 0.48-0.50 of YP in 1993. Average YW of rainfed wheat in the climatic regions of the province was estimated as 2000-2800 kg ha^{-1} with a negative trend due to decreased precipitation, the highest negative slope in YW (59 kg ha^{-1} y^{-1}) was found in the hot dry region. Rainfed wheat showed an extremely high yield gap in all climatic regions and mean relative yield gap (YG/YW) was estimated as 0.75-0.80 over the province. Mean YP of sugar beet in different climatic regions of the province was estimated from 78 to 88 t ha-1 with the lowest potential in hot-dry region. However, declining trend was found in the yield gap of sugar beet in all studied regions with the highest gap filling rate of 1.44 t ha^{-1} y^{-1} in temperate-dry region.

Conclusions: Simulated YP of sugar beet and irrigated wheat were higher in temperate-semi arid regions of the province and lower in hot-dry regions. However, cold-semi arid regions had the highest YW of rainfed wheat. When up-scaled over the province, YG85% was about 50% of YP for irrigated wheat and sugar beet and 25% for rainfed wheat. It was concluded that closing yield gap of sugar beet and irrigated wheat would be possible mainly by improving management practices however, for rainfed wheat breeding strategies should be considered as the first priority.

Keywords: Cross validation, Exploitable yield gap, Global yield gap atlas, Potential yield

1- Professor, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: akooch@um.ac.ir)